

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto
Rakennetekniikan laitos
Talonrakennustekniikka

Pia Ikonen

KEVYTRAKENTEISET JULKISIVUN KORJAUSMENETELMÄT

Diplomityö, joka on jätetty
opinnäytteenä tarkistettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa
19.01.1994.

Työn valvoja:
va. apul.prof. Ilmari Absetz
Työn ohjaaja:
DI Ari Junttila

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto
Rakennetekniikan laitos

Tekijä ja työn nimi: Pia Ikonen**KEVYTRAKENTEISET JULKISIVUN KORJAUSMENETELMÄT****Päivämäärä:** 19.01.1994**Sivumäärä:** 183**Osasto:**

Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto

Professuuri:

Talonrakennustekniikka

Työn valvoja: va. apul. prof. Ilmari Absetz**Työn ohjaaja:** DI Ari Junttila

Työssä tarkastellaan kevytrakenteisia, usein lisälämmöneristeen kanssa yhdessä käytettäviä julkisivun korjausmenetelmiä, joissa vanhan julkisivun päälle rakennetaan uusi julkisivurakenne ja julkisivupinta. Tarkoituksena on selvittää korjausmenetelmien, erityisesti saumallisen levykorjausmenetelmän ja saumattoman rapatun levykorjausmenetelmän soveltuvuutta julkisivukorjauksiin.

Betonielementtirakenteiset kerrostalot muodostavat suuren osan julkisivukorjauksen tarpeessa olevasta rakennuskannasta. Betonielementtijulkisivujen kehitystä ja vaurioitumista on tarkasteltu tehtyjen selvitysten ja tutkimusten pohjalta.

Tuuletusraollisen julkisivukorjausrakenteen vaikutusta ulkoseinän rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin tarkastellaan erityisesti verhouksen taakse muodostuvan tuuletusraon toiminnan kannalta. Tuuletusraon virtauksien, rakenteen lämpötilojen ja k-arvon määrittämiseen tarvittavat kaavat, kuten myös tuuletusraon kosteudenpoistokyvyn laskentamenetelmä on annettu käsinlaskentaa varten.

Olemassaolevia kevytrakenteisia julkisivukorjausmenetelmiä tarkastellaan rakenneratkaisujen ja saatujen kokemusten pohjalta. Eri menetelmien kustannuksia vertaillaan esimerkkikohteen yksikkökustannusten perusteella. Lisäksi selvitetään korjausmenetelmien kelpoisuuskriteerejä.

Kelpoisuuskriteerien pohjalta on tarkemmin selvitetty Lemminkäinen Oy:n maahantuomilla kalsiumsilikaattipohjaisilla julkisivulevyillä toteutetun saumallisen levykorjausmenetelmän soveltuvuutta julkisivukorjauksiin. Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten ja tehtyjen laskelmien perusteella levykorjausmenetelmän soveltuvuus on hyvä. Toisena tarkasteltavana korjausmenetelmänä on uusi saumattomaksi pinnaksi rapattavalla kalsiumsilikaattilevyllä toteutettu korjausrakenne. Menetelmästä saadut tutkimustulokset ovat soveltuvuuden kannalta positiivisia, mutta kokemukset todellisista kohteista puuttuvat.

Kokeellisessa osassa tutkittiin sadetuskokeen avulla saumallisen ja saumattomaksi rapatun levykorjausrakenteen sateenpitävyyttä, sekä säärasituskokeella rakenteiden toimivuutta säärasitusten alaisena. Tehdyissä kokeissa havaittiin saumallisen levyverhouksen sateenpitävyyden riippuvan levyjen kiinnitysratkaisusta. Yleisesti levykorjauksissa käytetty naulauskiinnitys aiheutti runsaasti sadevesivuotoja verhouksilevyjen taakse. Tiivistetyjä ruuveja käytettäessä verhouksrakenteen sateenpitävyys oli hyvä. Rapatun rakenteen sateenpitävyys oli erinomainen. Säärasituskokeessa tuuletusrako osottautui toimivaksi seinärakenteen kuivattajana, samoin lisälämmöneriste toimi odotusten mukaisesti. Kokeessa tuli esille rakenteessa olevien liittymädetaljien huolellisen suunnittelun tarkeys.

Lopuksi diplomityössä esille tulleiden asioiden pohjalta on annettu kaksi esimerkkiä toimivasta levykorjausrakenteesta Masterstone- ja BluClad-kalsiumsilikaattilevyjä käyttäen.

Author and name of the thesis: Pia Ikonen
LIGHTWEIGHT REPAIR SYSTEMS OF FACADES

Date: 19.01.1994

Number of pages: 183

Faculty:
Civil Engineering and Surveying

Professorship:
Structural Engineering and Building Physics

Supervisor: Associate Professor (Acting) Ilmari Absetz

Instructor: M.Sc.(Eng.) Ari Junttila

In this paper lightweight repair systems of facades with external thermal insulation, in which new external structure and front face is built over the old wall structure were studied. The main purpose was to examine the suitability of repair systems, concentrating especially on two ventilated over-cladding systems, one with open board joints and the other with a seamless rendered appearance.

Multi-storey dwellings with concrete element facades form a great part of buildings that need repairs of external walls. The study of the development and the damages of the concrete element facades was based on research papers made on the issue.

The effects of ventilated facades repair structure on the building physical qualities of the external wall were examined. The formulas needed for determining air flows in the air gap, temperatures of the structure layers and the thermal conductivity of the wall structure. The calculation method of the capacity for dehumidification of the air gap are given in form suitable for manual calculation.

Existing lightweight repair systems of external wall were studied on the basis of the structural solutions and the experiences obtained. The comparison of the costs of different methods was based on the unit costs of the example building. Furthermore, required qualifications of the repair methods was pointed out.

The competence of the cladding system with open board joints using calcium silicate boards was examined on the basis of the qualification requirements. Previous studies on the subject and calculations made in this paper show that the competence of the system is acceptable. The other system that was examined is the rendered cladding system using calcium silicate substrate boards. The test results are promising, but yet there is no experience of real structures in live conditions.

In laboratory tests the water penetration through the claddings and the durability of the whole overcladded wall structure during variable weather conditions were studied. In these tests it was noticed that the water tightness of the cladding system with the joints depends on the fixing solution of the boards. The water tightness of the rendered cladding system was excellent. In the weather test the ventilated structure proved to work well as the drier of the wall structure. The external insulation also worked as expected. The test showed the importance of the careful design of the connection details between the cladding and the other structures of the facade.

Finally two examples of the acceptable cladding structure using Maserstone and BluClad calcium silicate boards are given, based on the results of this research paper.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lemminkäinen Oy:n Kattoyksikössä tukemaan kevytrakenteisten julkisivun levykorjausmenetelmien kehittämistä. Työn valvojana on toiminut va. apul.prof. Ilmari Absetz Teknillisen Korkeakoulun rakennus- ja maanmittaustekniikan osaston talonrakennustekniikan oppituolista ja ohjaajana DI Ari Junttila Lemminkäinen Oy:stä. Heille haluan esittää parhaat kiitokseni.

Työn kokeellinen osuus suoritettiin säärasituskokeen osalta VTT:n Rakennusmateriaali-laboratoriossa ja sadetuskokeen osalta TKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa. Kiitän hyvää yhteistyöstä DI Jyri Niemistä VTT:ltä sekä TKK:n talonrakennustekniikan laboratorion henkilökuntaa.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat edesauttaneet työni valmistumista. Suurkiitokset Arto Vilhuselle Lemminkäinen Oy:stä kaikesta siitä avusta, jota olen matkan varrella saanut ja koko Kattoyksikölle mukavan työilmapiirin luomisesta.

Helsingissä 19.01.1994



Pia Ikonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | BETONIELEMENTTIJULKISIVUJEN NYKYKUNTO SUOMESSA | |
| 2.1. | Betonisten julkisivuelementtien kehitys | 3 |
| 2.2. | Vauriot | |
| 2.2.1. | Yleistä | 7 |
| 2.2.2. | Karbonatisoituminen ja terästen korroosio | 7 |
| 2.2.3. | Pakkasrapautuminen | 12 |
| 2.3. | Korjauksen tarve | 15 |
| 2.4. | Korjausvaihtoehdot | 16 |
| 3. | KEVYTRAKENTEISEN JULKISIVUKORJAUKSEN VAIKUTUKSET ULKO- SEINÄN RAKENNUSFYSIKAALISEEN TOIMINTAAN | |
| 3.1. | Tuulettuvuus | 18 |
| 3.2. | Lämpötekkinen toiminta | |
| 3.2.1. | Lisälämmöneristys | 21 |
| 3.2.2. | Tuuletusraon vaikutukset | 24 |
| 3.2.3. | Vaikutukset julkisivujen energiatalouteen | 26 |
| 3.3. | Kosteustekkinen toiminta | |
| 3.3.1. | Sadetiiviys | 27 |
| 3.3.2. | Tuuletusraon vaikutukset | 29 |
| 3.4. | Lämpö- ja kosteustekkinen mitoitus | |
| 3.4.1. | Yleistä | 30 |
| 3.4.2. | Ilmavirtaukset | 30 |
| 3.4.3. | Rakenteen lämpötilojen määrittäminen ja k-arvon laskenta | 36 |
| 3.4.4. | Rakenteen kosteudenpoistokyvyn määrittäminen | 38 |
| 4. | KEVYTRAKENTEISIA JULKISIVUNKORJAUSMENETELMIÄ | |
| 4.1. | Yleistä | 41 |
| 4.2. | Julkisivulevyillä tehtävä korjaus | |
| 4.2.1. | Menetelmän kuvaus | 42 |
| 4.2.2. | Menetelmän analysointi | 43 |
| 4.3. | Metallilevyillä tai -kaseteilla tehtävä korjaus | |
| 4.3.1. | Menetelmän kuvaus | 43 |
| 4.3.2. | Menetelmän analysointi | 45 |
| 4.4. | Julkisivukorjaus saumattomaksi pinnaksi rapattavilla levyillä tai kaseteilla | |
| 4.4.1. | Menetelmän kuvaus | 45 |
| 4.4.2. | Menetelmän analysointi | 47 |
| 4.5. | Elementtirakenteiset julkisivunkorjausmenetelmät | |
| 4.5.1. | Menetelmän kuvaus | 47 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.5.2. | Menetelmän analysointi | 49 |
| 4.6. | Lämpörappaus | |
| 4.6.1. | Menetelmän kuvaus | 49 |
| 4.6.2. | Menetelmän analysointi | 51 |
| 4.7. | Kustannukset | 52 |
| 4.8. | Menetelmien vertailuun ja valintaan vaikuttavia tekijöitä | 55 |
| 5. | SAUMALLISEN LEVYKORJAUSMENETELMÄN KELPOISUUS KALSIUM-SILIKAATTIPOHJAISIA JULKISIVULEVYJÄ KÄYTTÄEN | |
| 5.1. | Menetelmän kuvaus | |
| 5.1.1. | Levytiedot | 59 |
| 5.1.2. | Rakenneratkaisut ja detaljit | 62 |
| 5.2. | Mekaaninen toimivuus | |
| 5.2.1. | Levymateriaalin mekaaniset ominaisuudet | 65 |
| 5.2.2. | Kestävyys tuulikuormia vastaan | 66 |
| 5.2.3. | Kantavuus | 69 |
| 5.2.4. | Iskunkestävyys | 70 |
| 5.2.5. | Lämpö- ja kosteusliikkeet | 72 |
| 5.3. | Rakennusfysikaalinen toimivuus | |
| 5.3.1. | Sateenpitävyys | 73 |
| 5.3.2. | Lämmöneristävyys | 74 |
| 5.3.3. | Rakenteen kosteudet ja kosteudenpoistokyky | 77 |
| 5.4. | Ajan vaikutukset rakenteen ominaisuuksiin | |
| 5.4.1. | Pitkäaikaiskestävyyskokeet luonnonoloissa | 85 |
| 5.4.2. | Pakkasenkestävyys | 86 |
| 5.4.3. | Kestävyys kosteusvaihtelujen alaisena | 87 |
| 5.4.4. | Ulkonäön pysyvyys ja huollettavuus | 88 |
| 5.4.5. | Biologinen kestävyys | 88 |
| 5.5. | Paloturvallisuus | 89 |
| 5.6. | Päätelmät kelpoisuudesta | 89 |
| 6. | SAUMATTOMAN LEVYKORJAUSMENETELMÄN KELPOISUUS RAPATTUJA BLUCLAD-JULKISIVULEVYJÄ KÄYTTÄEN | |
| 6.1. | Menetelmän kuvaus | |
| 6.1.1. | Levytiedot | 91 |
| 6.1.2. | Rakenneratkaisut ja detaljit | 92 |
| 6.2. | Mekaaninen toimivuus | |
| 6.2.1. | Levymateriaalin mekaaniset ominaisuudet | 98 |
| 6.2.2. | Kestävyys tuulikuormia vastaan | 99 |
| 6.2.3. | Tason suuntaisten tuulikuormien kestävyys | 100 |
| 6.2.4. | Kantavuus | 105 |
| 6.2.5. | Iskunkestävyys | 105 |
| 6.2.6. | Lämpö- ja kosteusliikkeet | 106 |
| 6.3. | Rakennusfysikaalinen toimivuus | |
| 6.3.1. | Sateenpitävyys | 107 |
| 6.3.2. | Lämmöneristävyys | 108 |
| 6.3.3. | Rakenteen kosteudet ja kosteudenpoistokyky | 109 |
| 6.4. | Ajan vaikutukset rakenteen ominaisuuksiin | |
| 6.4.1. | Pitkäaikaiskestävyys | 109 |

| | | |
|--------|------------------------------------|-----|
| 6.4.2. | Ulkonäön pysyvyys ja huollettavuus | 111 |
| 6.4.3. | Biologinen kestävyys | 112 |
| 6.5. | Paloturvallisuus | 112 |
| 6.6. | Päätelmät kelpoisuudesta | 114 |

7. SADETUSKOKEET

| | | |
|--------|---|-----|
| 7.1. | Sadetuskoe I: Saumallinen Masterstone-julkisivulevyrakenne | |
| 7.1.1. | Tehtävä | 115 |
| 7.1.2. | Koerakenne | 115 |
| 7.1.3. | Koejärjestelyt | 116 |
| 7.1.4. | Koetulokset | |
| | 7.1.4.1. Läpäisevä vesimäärä ja veden läpitulon alkaminen | 117 |
| | 7.1.4.2. Koekappaleessa oleva vesimäärä | 124 |
| | 7.1.4.3. Veden kulkeutuminen rakenteessa | 125 |
| | 7.1.4.4. Vuotokohdat rakenteen purkamisen perusteella | 126 |
| 7.1.5. | Saatujen tulosten arviointi | 131 |
| 7.2. | Sadetuskoe II: Saumattomaksi rapattu BluClad-julkisivulevyrakenne | |
| 7.2.1. | Tehtävä | 134 |
| 7.2.2. | Koerakenne | 134 |
| 7.2.3. | Koejärjestelyt | 135 |
| 7.2.4. | Koetulokset | |
| | 7.2.4.1. Läpäisevä vesimäärä | 135 |
| | 7.2.4.2. Koekappaleessa oleva vesimäärä | 135 |
| | 7.2.4.3. Kosteuden kulkeutuminen rakenteessa | 136 |
| 7.2.5. | Saatujen tulosten arviointi | 136 |

8. SÄÄRASITUSKOKEET

| | | |
|--------|--|-----|
| 8.1. | Säärasituskoe I: Saumallinen julkisivulevyrakenne Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad- julkisivulevyillä | |
| 8.1.1. | Tehtävä | 138 |
| 8.1.2. | Koerakenne | 138 |
| 8.1.3. | Koejärjestelyt | 138 |
| 8.1.4. | Koetulokset | |
| | 8.1.4.1. Havainnot | 141 |
| | 8.1.4.2. Rakenteiden lämpötilat ja lämpövirrat | 144 |
| | 8.1.4.3. Rakenteiden kosteudet | 144 |
| 8.1.5. | Saatujen tulosten arviointi | 145 |
| 8.2. | Säärasituskoe II: Saumattomaksi rapattu BluClad-julkisivulevyrakenne | |
| 8.2.1. | Tehtävä | 147 |
| 8.2.2. | Koerakenne | 147 |
| 8.2.3. | Koejärjestelyt | 151 |
| 8.2.4. | Koetulokset | |
| | 8.2.4.1. Havainnot | 151 |
| | 8.2.4.2. Rakenteiden lämpötilat ja lämpövirrat | 154 |
| | 8.2.4.3. Rakenteiden kosteudet | 154 |
| | 8.2.4.4. Rappauspinnan muodonmuutokset | 154 |
| 8.2.5. | Saatujen tulosten arviointi | 155 |
| 8.3. | Koetulosten yhteistarkastelu | 156 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 9. | ESIMERKKIKOHTTEEN JULKISIVUKORJAUKSEN VAIHTOEHDOT | |
| 9.1. | Tietoja esimerkkikohteesta | 158 |
| 9.2. | Julkisivukorjaus Masterstone-levyillä | |
| 9.2.1. | Rakenne ja materiaalit | 159 |
| 9.2.2. | Liittymädetaljit | 162 |
| 9.2.3. | Mekaaninen toimivuus | 166 |
| 9.2.4. | Rakennusfysikaalinen toimivuus | 167 |
| 9.2.5. | Muut ominaisuudet | 168 |
| 9.2.6. | Korjauskustannukset | 168 |
| 9.3. | Julkisivukorjaus rapatuilla BluClad-levyillä | |
| 9.3.1. | Rakenne ja materiaalit | 169 |
| 9.3.2. | Liittymädetaljit | 170 |
| 9.3.3. | Mekaaninen toimivuus | 173 |
| 9.3.4. | Rakennusfysikaalinen toimivuus | 174 |
| 9.3.5. | Muut ominaisuudet | 174 |
| 9.3.6. | Korjauskustannukset | 175 |
| 10. | YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT | |
| 10.1. | Kevytrakenteiset julkisivun korjausmenetelmät ja betonielementtijulkisivujen korjaustarve | 177 |
| 10.2. | Kevytrakenteisen julkisivukorjauksen vaikutukset ulkoseinän rakennusfysikaaliseen toimintaan | 178 |
| 10.3. | Kalsiumsilikaattilevyillä toteutettujen korjausmenetelmien kelpoisuus | 179 |
| 10.4. | Jatkotutkimustarpeet | 182 |

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

1. JOHDANTO

Rakennusten julkisivukorjaukset ovat viime vuosina nousseet voimakkaasti esille kerrostalojen, erityisesti betonielementtirakenteisten asuinrakennusten laajojen julkisivuvaurioiden vuoksi. Erilaisia julkisivukorjausmenetelmiä on kehitetty ja toteutettu kevyistä laastipaikkauksista koko julkisivun purkamiseen ja uusimiseen asti ja tutkimuksia eriasteisista korjausmenetelmistä on käynnistetty monilla tahoilla. Mittava julkisivujen korjaaminen on vasta alkamassa, ja tässä vaiheessa on tärkeää huolellisesti tutkia eri menetelmien soveltuvuutta ja kehitystarpeita.

Tässä diplomityössä keskitytään tarkastelemaan kevytrakenteisia julkisivukorjausmenetelmiä, joilla tässä yhteydessä tarkoitetaan rakenteellisia, usein lisälämmöneristeen kanssa yhdessä käytettäviä korjausmenetelmiä. Vanhan julkisivun päälle rakennetaan uusi julkisivurakenne ja julkisivupinta. Menetelmät voidaan siinä mielessä ajatella kevytrakenteisiksi, ettei korjausrakenne yleensä tarvitse omaa perustusta tai konsolia, vaan se kiinnitetään olemassaoleviin rakenteisiin. Vanhaa julkisivurakennetta ei myöskään tavallisesti pureta.

Työn tarkoituksena on aluksi kartoittaa betonielementtijulkisivujen nykykuntoa, vaurioita sekä korjaustarpeen laajuutta Suomessa. Luvussa 2 tehty tarkastelu perustuu aiheesta tehtyihin selvityksiin ja lähinnä VTT:n tekemiin vauriotutkimuksiin yhdistettynä kerrostaloista kerättyihin määrätilastoihin.

Tuuletusraollisen ja lisälämmöneristetyn julkisivukorjausrakenteen vaikutusta ulkoseinän rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin tarkastellaan luvussa 3, jossa käsitellään tuuletusraon virtauksien suuruuteen, rakenteen lämmöneristävyYTEEN ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi selvitetään korjausrakenteen lämpö- ja kosteusteknisen mitoituksen periaatteita ja annetaan laskentakaavat käsinlaskentaa varten.

Kevytrakenteisten korjausmenetelmien osalta käydään läpi erilaisten menetelmien ominaisuuksia ja analysoidaan menetelmien kelpoisuutta rakenneratkaisujen ja tehdyistä korjauksista saatujen kokemusten perusteella. Tarkasteltavina korjausmenetelminä ovat julkisivulevyillä tehtävä korjaus, metallilevyillä tai -kaseteilla tehtävä korjaus, julkisivukorjaus saumattomaksi pinnaksi rapattavilla levyillä tai kaseteilla, elementtirakenteiset korjausmenetelmät sekä lämpörappaus. Menetelmiä vertaillaan myös korjauskustannusten kannalta laskemalla esimerkkikohteen julkisivukorjauksen yksikkökustannukset eri korjausmenetelmillä. Lisäksi selvitetään korjausmenetelmien vertailussa ja valinnassa käytettäviä kelpoisuuskriteerejä yleisellä tasolla sekä kohdekohtaisesti.

Työn tärkeimpänä tavoitteena on kalsiumsilikaattipohjaisilla julkisivulevyillä toteutetun saumallisen levykorjausmenetelmän sekä uuden saumattomaksi pinnaksi rapattavan levykorjausmenetelmän toiminnan arvioiminen ja kelpoisuuden selvittäminen Suomen oloissa. Kelpoisuutta selvitetetään eri kelpoisuuskriteerien osalta aikaisemmin tehtyjä kokeellisia tutkimuksia analysoimalla sekä laskelmien avulla. Tuuletusraon rakennusfysikaalisen toiminnan arvioimisessa on käytetty käsinlaskentamenetelmiä sekä Teknillisen Korkeakoulun Rakennetekniikan laboratoriossa kehitettyä RAKO-ohjelmaa, joka perustuu putkivirtauksen perusyhtälöihin sekä luvussa 3. esitettyihin laskentakaavoihin.

Valittujen menetelmien kelpoisuuden analysointia täydennetään kokeellisilla tutkimuksilla. Saumallisen sekä saumattomaksi rapatun levyverhouksen sateenpitävyyttä tutkitaan Teknillisen Korkeakoulun Talonrakennustekniikan laboratorion sadetuslaitteiston avulla. VTT:n sää-

rasituslaitteistolla tutkitaan kokonaisten seinärakenteiden toimivuutta ulkoilman säärasitusten alaisena. Kokeen avulla saadaan tietoa pintamateriaalien kestävydestä, tuuletusraon ja lisälämmöneristeen toiminnasta ja seinärakenteessa vallitsevista olosuhteista sääolosuhteiden vaihdellessa.

Diplomityössä esille tulevien asioiden pohjalta kehitetään tutkittujen korjausmenetelmien käytössä olevia rakenneratkaisuja, jotka esitetään kahden esimerkkikohteeseen tehdyn korjausvaihtoehdon muodossa.

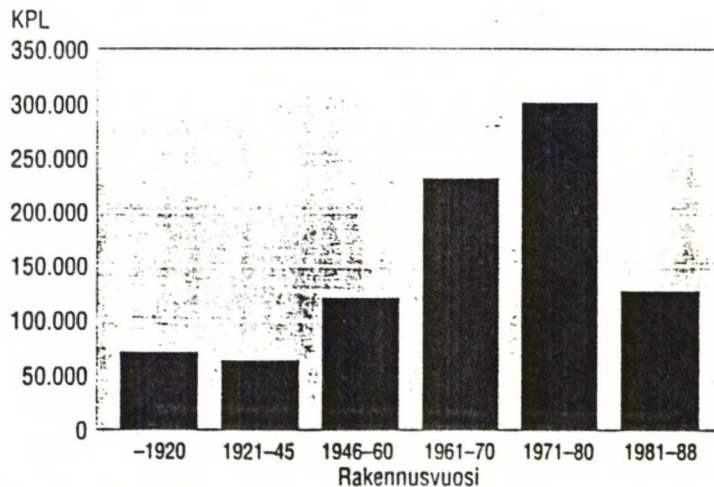
2. BETONIELEMENTTIJULKISIVUJEN NYKYKUNTO SUOMESSA

2.1. BETONIELEMENTTIJULKISIVUJEN KEHITYS

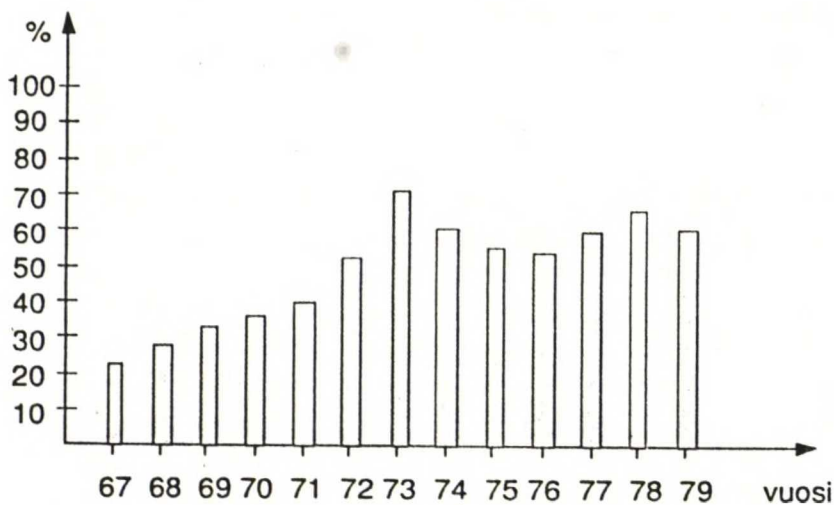
Betonin käyttö yleistyi 1950-luvulla huomattavasti kerrostalojen rakenteissa, kun betonista alettiin tehdä kantavia seiniä myös maanpinnan yläpuolisiin kerroksiin. Betonoinnissa tarvittavan muottikaluston käsittelyä varten työmaalle oli hankittava torninosturi. Seuraavassa kehitysvaiheessa alettiin yksinkertaisempia rakenneosia tehdä valmiiksi maan tasolla.

Suomessa ensimmäiset betonielementtijulkisivut rakennettiin jo 1950-luvun alkupuoliskolla. 1960-luvun alussa elementtituotanto kasvoi erittäin nopeasti ja siirtyi samalla työmailta tehtai-
siin.

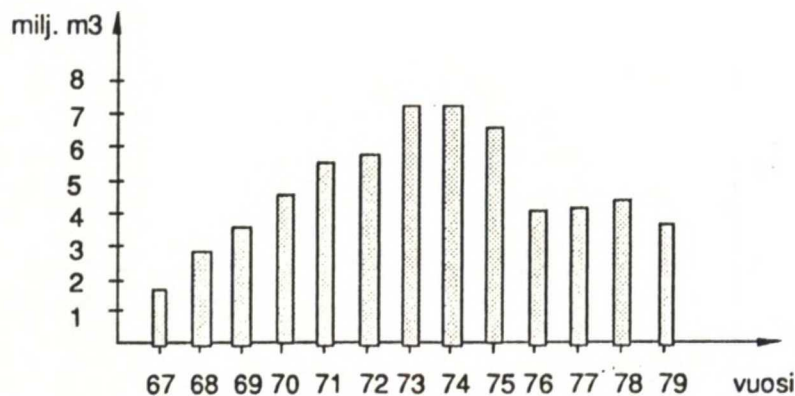
Kuvassa 2.1. on esitetty kerrostaloasuntojen ikäjakauma Suomessa, kuvassa 2.2. betonielementtirakenteisten asuinkerrostalojen osuus rakennetuista asuinkerrostaloista vuosina 1967-79 ja kuvassa 2.3. vuosina 1967-79 rakennettujen betonielementtirakenteisten asuinkerrostalojen määrät.



Kuva 2.1. Kerrostaloasuntojen ikäjakauma /21/.



Kuva 2.2. Betonielementtirakenteisten asuinkerrostalojen osuus rakennetuista asuinkerrostaloista vuosina 1967-79 /45/.



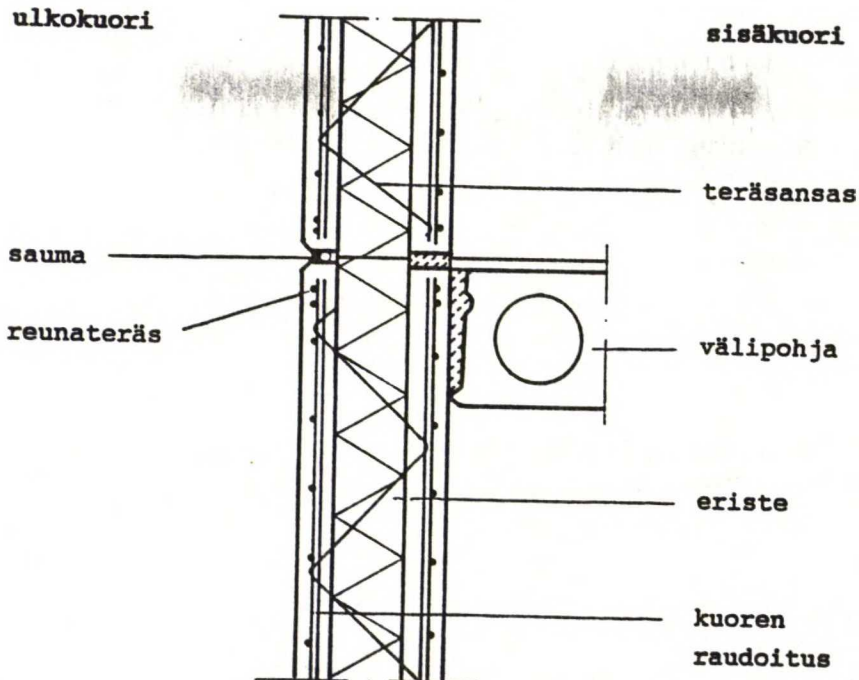
Kuva 2.3. Betonielementtirakenteiden asuinkerrostalojen määrät vuosina 1967-79 /45/.

Kuvasta 2.1. nähdään, että 1960- ja 1970-luvuilla rakennettiin yhteensä noin 530 000 kerrostaloasuntoa, kun sitä vanhempia kerrostaloasuntoja on noin 260 000 kpl. Vuosina 1967-1979 rakennettiin betonielementtirakenteisia asuintaloja n. 60 milj. m³ (kuva 2.3.) ja muita asuinkerrostaloja yhteensä suunnilleen saman verran. Lähteessä /4/ on esitetty ulkoseinien suhteelliseksi määräksi kivisissä asuinkerrostaloissa ilman ikkunoita ja ikkunallisia ovia 170 m²/1000 m³. Näillä luvuilla saadaan vuosina 1967-79 rakennettujen betonielementtirakenteiden julkisivujen kokonaispinta-alaksi noin 10 milj. m². Vuosina 1967-79 tehtyjä julkisivuelementtejä on tämän mukaan noin 8 milj. m². Suomen rakennuskannassa yhteensä on betonipohjaisia julkisivuja rakennettu n. 38 milj. m².

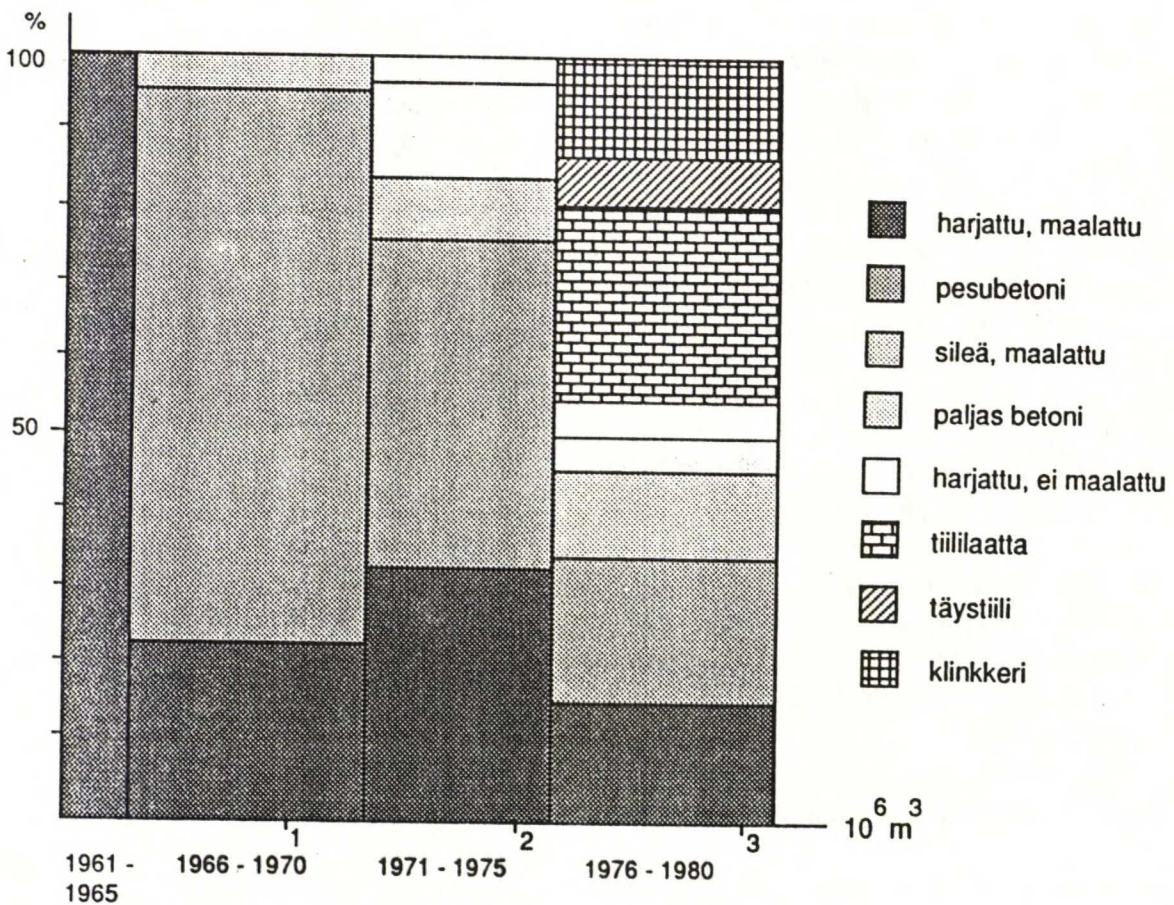
Elementit voidaan jakaa rakenteiden mukaisesti kuori- ja sandwich-elementteihin. Muodoltaan elementit voivat olla kerroksen korkuisia ja neliömäisiä eli ruutuja, kerroskorkeutta matalampia eli nauhoja tai pystysuuntaisia levyjä. Kuorielementtien valtakausi ajoittuu 1950-luvulle ja 1960-luvun alkuvuosiin. Niitä on pääasiassa käytetty nauhajulkisivujen elementtinä. Sandwich-elementtien käyttö yleistyi 1960-luvun puolivälissä. Alussa tehdyt sandwichit olivat nauhamaisia, mutta melko pian siirryttiin yhden tai kahden asuinhuoneen ohi ulottuviin ruutuelementteihin /45/. Kuvassa 2.4. on esitetty kantamaton sandwich-elementtirakenne.

Betonisen ulkokuoren paksuus vaihtelee 40...85 mm:iin ja sisäkuoren 70...150 mm:iin riippuen siitä, onko elementti kantavana vai itsensä kantavana rakennusosana. Ulkokuorien väliset saumat on yleensä tiivistetty elastisella saumaussmassalla. Kantamattomat elementit ripustetaan kantaviin rakenteisiin, kuten laattoihin, palkkeihin, pilareihin tai kantaviin väliseiniin.

Kuvassa 2.5. on esitetty julkisivuissa käytetyt betonityypit 5-vuotiskausittain 1960- ja 1970-luvuilla. Betonielementtien pintoina on käytetty betonia värjäämättömänä ja maalattuna, pesubetonia, kalkkahiiekkakivilaattaa, tiililaattaa, täystiiltä ja klinkkerilaattaa. Pesubetonipinnassa käytetyn kiviaineksen maksimiraekoko oli alussa 25 mm ja vasta 1960-luvun loppupuolella siirryttiin käyttämään maksimiraekooltaan 16 mm kiviainesta. Klinkkerilaattaa on käytetty 1970-luvulta lähtien.



Kuva 2.4. Sandwich-elementtirakenne /17/.



Kuva 2.5. Julkisivutyypit pintamateriaalien mukaan 5-vuotiskausittain 1960- ja 1970-luvuilla /19/.

K20 K25 K30 K45
54 - 65 83 92

Ennen vuotta 1954 määrättiin lujuuden sijasta betonin valmistuksessa käytettävä vähimmäis-sementtimäärä. Vuodesta 1954 vuoteen 1965 asti julkisivurakenteen lujuusvaatimus oli K20, jolloin se muuttui K25:ksi. Vuonna 1989 lujuusvaatimukseksi tuli K30 ja nykyään on vuodesta 1992 lähtien julkisivurakenteisiin vaadittu K45 betonia. Vuodesta 1980 alkaen on lisäksi vaadittu vedenpitävyyttä ja pakkasenkestävyyttä. Betonin pakkasenkestävyyden tarve oli huomattu selvästi jo aikaisemmin. Kuitenkin ennen vuotta 1976 julkisivuissa ei käytetty pakkasenkestävää betonia (vuosina 1967-1975 rakennettiin betonielementtijulkisivuja noin 8 milj. m²). Vaadittu suojahuokossuhde oli vuosina 1980 - 1992 0,2 ja vuodesta 1992 lähtien 0,17 johtuen lujemmasta betonilaadusta /18/ /45/.

1960-luvun alkupuolen betonimassa oli hyvin notkeata, koska kunnollisia täryttimiä ei ollut. Massan notkeus saatiin aikaan suurella vesimäärällä. Suuri vesimäärä aiheutti suuria kuivumiskutistumia. 1960-luvulla sauvatäryttimen rinnalle tuli muottitärytys, joka teki mahdolliseksi jäykempien massojen käytön. Lisäaineiden laajamittainen käyttö alkoi 1970-luvulla. Eniten käytetty lisäaine on notkistin, jonka käytön myötä julkisivun laatu parani.

Elementtirakenteisten julkisivujen pääasiallisena lämmöneristeenä on käytetty mineraalivilloja. Sandwich-elementteihin soveltuvat mineraalivillat tulivat markkinoille vuonna 1964. Sandwich-elementeissä käytettyjen mineraalivillojen puristuslujuus on kasvanut vuosina 1964-1983 arvosta 2 kN/m² arvoon 5 kN/m². Julkisivujen k-arvo oli 1960-luvulla keskimäärin 0,40 W/m²K. 1974 alkaen vaadittiin julkisivuilta k-arvoa 0,35 W/m²K. Vuonna 1985 laskettiin k-arvo 0,28 W/m²K. Keskimääräiset eristepaksuudet ovat 1960- ja 1970-luvulla kasvaneet 80 mm:stä 120 mm:iin ja vuonna 1985 140 mm:iin. Asennettaessa elementin eristeeksi 80 mm heikkolujuuksista mineraalivillaa saattoi se käsittelyvirheiden, valupaineen ja elementin päällä kävelyn takia puristua kauttaaltaan 50 - 60 mm paksuksi kerrokseksi, paikoin jopa ohuemmaksi /45/.

Vuonna 1965 siirryttiin standardin saattelemana käyttämään ansaiden diagonaaliosassa ruostumatonta terästä. Teräksiä suojaavan betonipeitteen paksuusvaatimus julkisivurakenteissa on ollut 25 mm vuodesta 1977 ja tätä ennen 20 mm harjateräksille. Sileälle pyöröteräkselle vaatimukset ovat olleet alhaisemmat kuin harjateräkselle. Lisäksi vuoden 1963 betonielementtinormit antoivat lievennyksiä betonielementtien muutenkin alhaisiin suojapaksuuksiin. Raudoitusten asennustarkkuus ja varmuus paikallaan pysymisen suhteen oli heikko, joten raudat saattoivat olla minkä pinnan tuntumassa tahansa ja suojakerroksen paksuus jäi muutamaa millimetriä /19/.

Verrattain pian otettiin käyttöön kovettumisen nopeuttaminen kuuman höyryn avulla. Myöhemmin, noin 1960- ja 1970-lukujen vaihteessa, tulivat erityiset höyryunit ja 1970-luvulla infrapunälämmitys. Lämpökäsittelyä käytettiin paljon ja käytetään vieläkin, mutta alkuvaiheessa sitä ei hallittu. Liian voimakas lämpökäsittely alentaa betonin lujuutta 10 - 30 %. Lämpökäsittelyssä saatettiin käyttää jopa 80 °C höyryä, kun nykyään pyritään käyttämään korkeintaan 50 °C höyryä. Lisäksi nykyään lämpökäsittely jaetaan jaksoihin, joihin sisältyvät kovettumisreaktion kannalta tärkeät alkua- ja jälkikäsitelystajat.

Tarkemmin julkisivuissa käytettyjä betonielementtejä on tarkasteltu lähteessä /45/.

2.2. VAURIOT

2.2.1. YLEISTÄ

Betonelementtien käyttöön julkisivuissa siirryttiin varsin nopeasti ilman kokemusperäistä tietoutta rakenteen pitkäaikaiskestävyydestä. Monet betonirakenteiden kestävyysvaikuttevat tekijät ovat tulleet suunnittelijoiden tietoon vasta viime vuosina. Osaltaan myös viranomais määräysten ja normien puutteet sekä elementtien valmistuksessa tapahtuneet virheet ovat johtaneet siihen, että betonijulkisivujen käyttöikä on monissa tapauksissa osoittautunut odotettua paljon lyhyemmäksi.

Betonisten julkisivuelementtien tärkeimmät käyttöikää rajoittavat säilyvyystekijät ovat betonin karbonatisoituminen ja raudotteiden korroosio sekä pakkasrapautuminen. Näiden turmeltumismilmiöiden takia joudutaan ennenpikkää, niiden vapaasti edistyyssä, soveltamaan erilaisia julkisivun korjaustoimenpiteitä.

Muita betonijulkisivujen ongelmakohtia ovat sideansaiden korroosio- ja tartuntaongelmat, vuotavat saumarakenteet, maalaus käsittelyn usein lyhyt käyttöikä ja klinkkerilaattojen irtoaminen.

Betonijulkisivuun liittyvien rakenteiden vauriot aiheuttavat yleensä lisärasitusta julkisivulle. Tällaisia ovat esimerkiksi pellitysten, räystäiden, syöksytörvien, ikkunaliitosten, ulkotasojen ja parvekkeiden vauriot. Ne vaikuttavat itse julkisivun toimivuuteen, rasitustasoon ja kestävyysvaikutteeseen.

2.2.2. KARBONATISOITUMINEN JA TERÄSTEN KORROOSIO

Normaalisti betonin ympäröivät raudotteet ovat hyvin korroosiolta suojattuja, sillä betoni suojaa teräksiä kahdella tavalla: kemiallisesti ja fysikaalisesti. Betonin korkea alkalisuus aiheuttaa tiiviin oksidikalvon muodostumisen teräksen pinnalle. Ilmiötä kutsutaan passivoitumiseksi, koska oksidikalvo estää korroosion etenemisen teräksessä. Betonikerros myös hidastaa korroosiolle välttämättömien veden ja hapen sekä korroosiota edistävien aineiden, kuten kloridien pääsyä raudotteille. Fysikaalisen suojan tehokkuus riippuu betonin tiivyydestä, ts. sen läpäisykyvystä sekä betonipeitteen paksuudesta /43/.

Betonin huokosissa olevan liuoksen emäksisyys on portlandsementillä suuruusluokkaa 13 - 14. Teräksen tilaan vaikuttaa pH-arvon lisäksi teräksen elektrodipotentiaali. Tämä mittaa teräksen ja sitä ympäröivän liuoksen välistä potentiaaliero. Potentiaalin laskiessa riittävän alhaiseksi korroosio tyrehtyy, koska raudan liukeneminen ei ole termodynaamisesti mahdollista. Tällöin teräs on immuunitilassa.

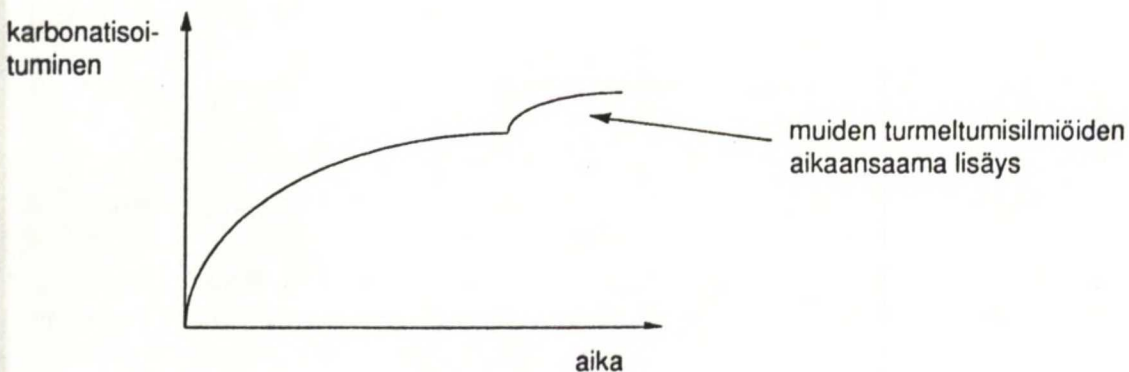
Ilmatilassa olevissa betonirakenteissa korroosio voi alkaa raudotteissa vain, jos niitä ympäröivässä betonissa tapahtuu muutoksia. Muutokset voivat olla fysikaalisia kuten halkeilu tai rapautuminen, joiden seurauksena osa teräspinnasta paljastuu ja jää ilman betonin fysikaalista ja kemiallista suojaa. Jos halkeama on hyvin pieni, säilyy betonilla tietty suojausvaikutus, vaikka se heikkeneekin.

Raudotteita suojaavassa betonissa voi tapahtua myös kemiallisia muutoksia, joiden seurauksena betonin alkalisuus (pH-arvo) alenee tai terästen passiivikalvo muuten tuhoutuu kemiallis-

ten aineiden vaikutuksesta. Julkisivuissa terästen korroosion kannalta tärkein tekijä on betonin karbonatisoituminen. Se aiheutuu ilman sisältämän hiilidioksidin kemiallisista reaktioista sementin reaktiotuotteiden, lähinnä kalsiumhydroksidin kanssa. Karbonatisoitumisen yksi reaktiotuote on kalsiumkarbonaatti. Karbonatisoitumisen seurauksena pH-arvo laskee likimain tasolle 8, joka on tarpeeksi alhainen passiivisuojan tuhoutumiselle ja korroosion alkamiselle. Teollisessa ympäristössä rikkipitoiset happamat kaasut voivat aiheuttaa neutraloitumisen nopeutumisen ja pH-arvon alentumisen siitä, mitä hiilidioksidi yksinään aiheuttaisi.

Karbonatisoituminen etenee rakenteen pinnalta alkaen vähitellen. Etenemisnopeus hidastuu ajan kuluessa, koska karbonatisoituminen tiivistää betonia ja hiilidioksidin pääsy karbonatisoitumisvyöhykkeelle vähenee. Tiiviissä betonissa eteneminen voi pysähtyä lähes kokonaan. Karbonatisoitunut vyöhyke pinnan läheisyydessä on varsin jyrkkärajainen, ja se saadaan helposti näkyviin pH-indikaattoreilla, esimerkiksi fenoftaleiiniliuoksella, pintaan piikatusta pinnasta koealueesta.

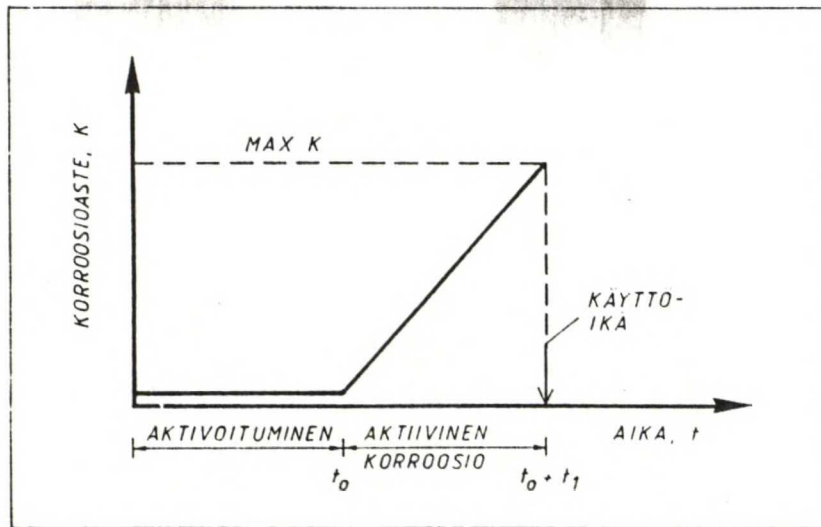
Kun karbonatisoituminen on edennyt teräksiin asti, alkavat teräkset ruostua. Korroosio on karbonisoituneessa betonissa hidasta, mutta ruosteen terästä suurempi tilavuus aiheuttaa paineen, joka halkaisee tai lohkaisee betonipeitteen. Betonipeitteen halkeamisen jälkeen betoniin pääsee uusia halkeamia pitkin entistä enemmän hiilidioksidia ja karbonatisoitumisen edellytykset paranevat. Lisäksi halkeamiin voi päästä vettä, joka jäätyessään rikkoo rakenteeseen lisää halkeamia. Karbonatisoituminen etenee paikallisesti entistä nopeammin.



Kuva 2.6. Karbonatisoituminen ajan funktiona /45/.

Lähteessä /43/ on esitetty betonirakenteen teoreettinen käyttöikä terästen korroosion suhteen matemaattisella mallilla, jossa vaikuttavia tekijöitä ovat betonipeitteen paksuus, betonin laatu ja ulkoiset olosuhteet. Korroosion alkamisajankohta julkisivurakenteilla on se hetki, kun karbonatisoituminen rikkoo betonipeitteen passiivikalvon. Korroosion käynnistyttyä käyttöikä katsotaan yleensä päättyneeksi, kun teräksiä suojaava betonipeite lohkeaa korroosion johdosta ja rakenne joudutaan korjaamaan tai uusimaan.

Käyttöiän laskentaperiaate on esitetty graafisesti kuvassa 2.7. Aluksi teräkset ovat suojattuja eikä korroosiota tapahdu. Korroosio käynnistyy, kun karbonatisoituminen aktivoi korroosion. Aikaa, jonka teräkset ovat passiivivilassa, kutsutaan korroosion aktivoitumisajaksi. Aktivoitumisen jälkeen korroosio etenee tasaisella nopeudella, kunnes suurin sallittava korroosioaste saavutetaan. Tähän kuluva aika kutsutaan aktiiviseksi korroosioajaksi.



Kuva 2.7. Käyttöiän laskentaperiaate /43/.

Käyttöikä määritellään kuvan mukaisesti /43/

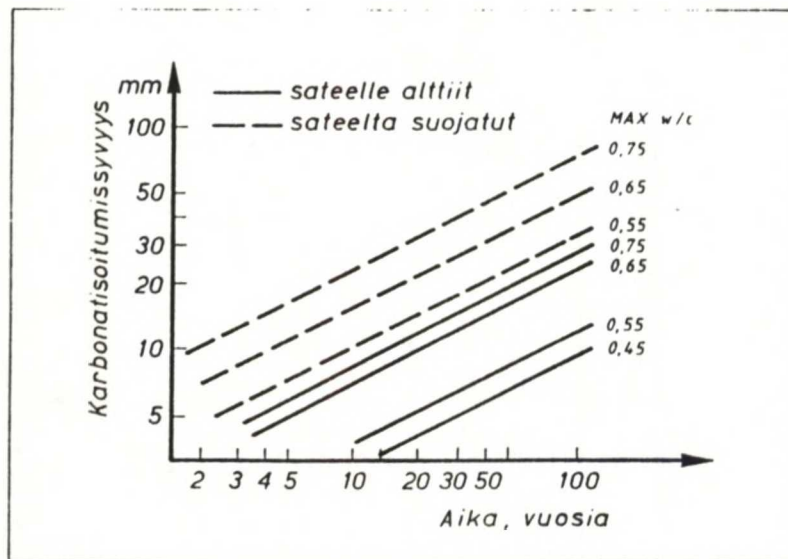
$$t_L = t_0 + t_1 \quad (2.1.)$$

t_1 = käyttöikä
 t_0 = korroosion aktivoitumisaika
 t_1 = aktiivinen korroosioaika.

Suurin sallittava korroosioaste ei aina määräydy betonipeitteen lohkeamisen perusteella. Esimerkiksi jännitetyissä rakenteissa ei sallita lainkaan terästen korroosiota, joten käyttöikä määrittyy pelkästään aktivoitumisajan perusteella. Terästen ollessa hyvin syvällä betonissa suurin sallittava korroosioaste määräytyy sallittavan teräspinta-alan pientymisen mukaan.

Korroosion alkaminen riippuu siis karbonatisoitumisnopeudesta, joka taas riippuu ennen kaikkea betonin tiiviyydestä ja kalsiumhydroksidipitoisuudesta. Näitä ominaisuuksia voidaan kuvata betonin vesi-sementtisuhteella. Karbonatisoitumissyvyyden riippuvuus ajasta sekä betonin vesi-sementtisuhteesta on esitetty kuvassa 2.8.

Kuvasta nähdään, että sadeveden pääsy rakenteen pintaan vaikuttaa oleellisesti karbonatisoitumisnopeuteen. Jos rakenteet ovat suojattuja sateelta, on karbonatisoituminen huomattavasti nopeampaa kuin jos rakenteet ovat alttiina sateille. Tämä johtuu siitä, että betonin huokosissa oleva vesi hidastaa hiilidioksidin pääsyä betoniin sekä siitä, että syvällä betonissa oleva kalsiumhydroksidi voi liuenneessa muodossa kulkeutua sadeveden mukana pintaa kohti. Julkisivurakenteita ei voi pitää tässä yhteydessä tarkoitettuna sateelle alttiina pintana, koska sille osuu vain viistosateet, ja silloinkin voimakkaimmin vain yhdelle rakennuksen seinäpinnalle kerrallaan.



Kuva 2.8. Keskimääräisen karbonatisoitumissyvyyden yläraja-arvot portlandsementti-betonilla eri vesi-sementtisuhteilla /43/.

Karbonatisoitumissyvyys voidaan myös esittää kaavan muodossa /43/:

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad (2.2.)$$

$X =$ karbonatisoitumissyvyys (mm)
 $t =$ aika (y)
 $k =$ karbonatisoitumiskerroin

Kuvan 2.8. avulla karbonatisoitumiskerroin määritetään kaavoilla

$$k = 26 \cdot (w/c - 0,3)^2 + 1,6 \quad (\text{sateelta suojatut rakenteet}) \quad (2.3.)$$

$$k = 10 \cdot (w/c - 0,3)^2 + 0,7 \quad (\text{sateelle alttiit rakenteet}) \quad (2.4.)$$

$w/c =$ vesisementtisuhte

Vastaavat karbonatisoitumiskertoimet voidaan likimääräisesti esittää myös betonin puristuslujuuden funktiona seuraavasti:

$$k = 0,0083 \cdot (53 - f_c)^2 + 1,6 \quad (\text{sateelta suoj. rak.}) \quad (2.5.)$$

$$k = 0,0032 \cdot (53 - f_c)^2 + 0,7 \quad (\text{sateelle alttiit rak.}) \quad (2.6.)$$

$f_c =$ puristuslujuus 28 d:n iässä.

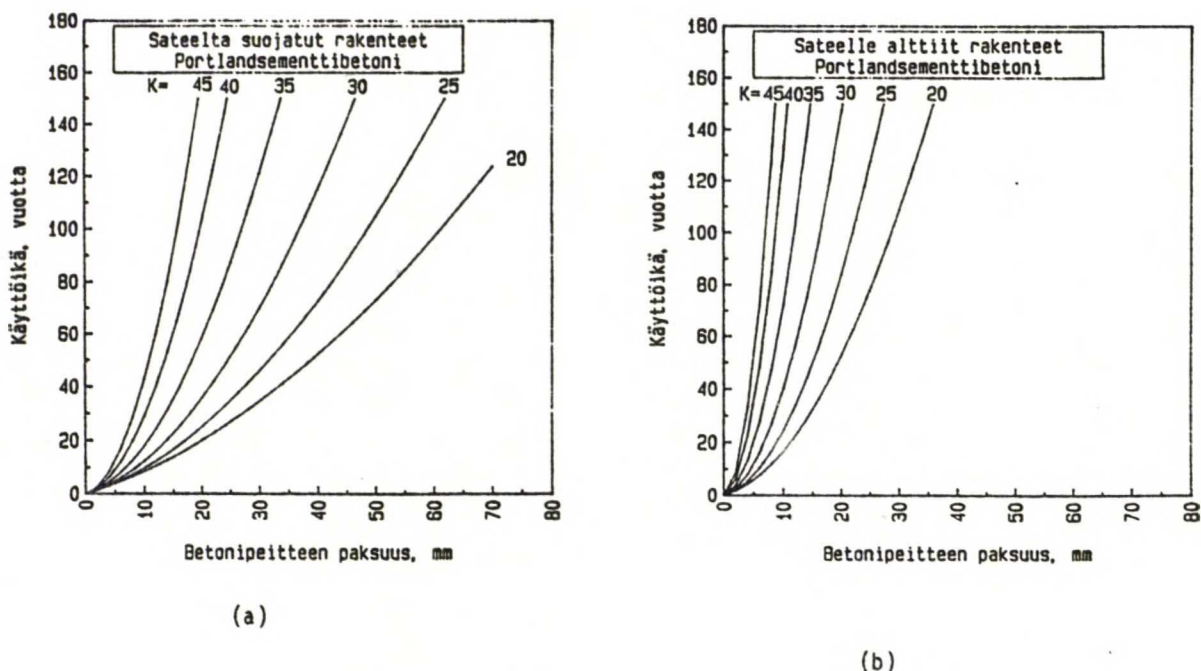
Aktiivinen korroosioaika betonipeitteen lohkeamisen perusteella voidaan arvioida yksinkertais-tetulla kaavalla /43/

$$t_1 = k_a \cdot L \quad (2.7.)$$

t_1 = aktiivinen korroosioaika (y)
 k_a = aktiivisen korroosioajan kerroin
 L = betonipeitepaksuus.

Karbonatisoitumisen aiheuttamalle korroosiolle k_a on likimäärin 0,5 - 1 /43/.

Kuvassa 2.9. on esitetty ilmatilassa olevien portland- tai yleissementtisidosaineisten betonirakenteiden käyttöiät rakenteen ollessa sateelta suojattuna tai sateelle alttiina.



Kuva 2.9. Käyttöiät ilmatilassa olevilla rakenteilla, jotka ovat a) suojattuja sateilta tai b) alttiina sateille. Portland- tai yleissementti /43/.

Pystysuoria julkisivupintoja käsitellään tässä yhteydessä sateelta suojattuina pintoina. Kuvasta 2.9. nähdään, että esimerkiksi lujuusluokan K25 betonia käytettäessä 25 mm peitepaksuudella jää julkisivurakenteen kestoikä alle 40 vuoden. Nykyisellä 25 mm peitepaksuudella 100 vuoden tavoitekestoikä saavutetaan käyttämällä likimain lujuusluokkaa K35.

Usein kestävyysvaikutukset ovat niin monimuotoisia, että niiden täydellinen kuvaaminen yksinkertaisella mallilla on mahdotonta. Varsinkin erilaisilla ympäristötekijöillä saattaa olla mutkikkaita keskinäisiä vuorovaikutuksia, joita ei täysin edes tunneta. Lisäksi ilmiöiden satunnaisuus, kuten sääerot eri vuosina johtavat hajontaan käyttöiän määrittämisessä. Toistaiseksi laskennan kehitystä todennäköisyystilastolliseen suuntaan on hidastanut tiedon puute parametrien todellisista frekvenssijakautumista.

Karbonatisoitumisnopeuden hajonta on käytännön mittauksissa todettu hyvin suureksi, joten alhaiset peitepaksuudet eivät välttämättä johda korroosiovaurioihin rakenteen käyttöiän aikana.

Pintatarvikkeista keraamiset laatat hidastavat karbonatisoitumista, jos ne ovat tiiviisti kiinni betonissa. Laattojen saumoista ja mm. elementtien syrjistä karbonatisoituminen kuitenkin etenee normaalisti.

Tärkeimmät tekijät, joilla betonin suojauskykyä voidaan edellä esitetyn perusteella parantaa ja aktiivisen korroosion alkamista lykätä uuden betonirakenteen osalta, ovat betonin tiiviynen varmistaminen alhaista vesisementtisuhdetta, huolellista tiivistystä ja riittävää jälkihoitoa käyttäen sekä riittävän paksun suojabetonikerroksen käyttö.

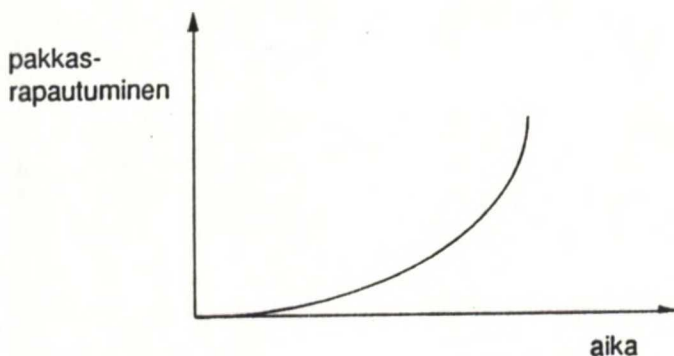
Karbonatisoitumisen ja terästen korroosion merkkejä julkisivussa ovat mm.

- ruosteen esiintyminen betonipinnassa raudoitteen kohdalla
- betonin lohkeilu, halkeilu ja rapautuminen ja terästen esiintulo
- klinkkereiden ja tiililaattojen halkeilu ja irtoaminen

2.2.3. PAKKASRAPAUTUMINEN

Pakkasrapautuminen on ilmiö, jossa betonin riittämätön pakkasenkestävyys johtaa betonirakenteen säröilyyn. Tämä aiheuttaa aluksi mm. betonin lujuus- ja kimmo-ominaisuuksien heikkenemistä ja myöhemmin pakkassäröilyn lisääntyessä betoni alkaa lohkeilla ja rapautua.

Pakkasrasitus syntyy betonin huokosrakenteessa olevan veden jäätyessä. Jäätymisessä tapahtuva veden tilavuuden kasvaminen (n. 9%) aiheuttaa paineen, joka murtaa betonia. Murtuminen koskee joka kerta yhä laajempaa aluetta rakenteesta, koska halkeamien verkosto laajenee rakenteessa aina kun vesi ei pääse jäätyessään laajenemaan olemassa olevissa halkeamissa tai huokosissa. Lisäksi betonin sisäistä painetta lisää jääkideiden kasvuilmiö pitkän ajan jäätyneessä tilassa olevassa betonissa.



Kuva 2.10. Pakkasrapautumisen edistyminen ajan funktiona /45/.

Betonin huokosiin vesi pääsee esimerkiksi sateen vaikutuksesta ja sandwich-seinän ulkokuoren sisäpintaan tiivistyvistä diffuusiokosteudesta. Pakkasrasitusasteeseen vaikuttavat pääasiassa ulkoiset kosteus- ja lämpötilaosuhteet. Yleiset ilmastotiedot eivät kuitenkaan riitä kuvaamaan rakenteen pakkasrasitusastetta, koska rasitus voi vaihdella merkittävästi mm. ympäröivien rakenteiden suojausvaikutuksesta ja rakenteen geometriasta riippuen. Rasituksen suuruus riippuu siis rakennetta ympäröivästä mikroilmastosta.

Betonin vaurioituminen tai säilyminen jäätymistilanteessa riippuu sen sisältämän kosteuden määrästä. Kosteuden määrä ilmaistaan kyllästysasteena, mikä tarkoittaa vedellä täyttyneiden huokosten suhteellista tilavuusosuutta kokonaishuokoisuudesta. Kullakin betonilla on nk. kriittinen vedelläkyllästysaste, jonka yläpuolella betoniin syntyy vaurioita, mutta jonka alapuolella betoni säilyy ehjänä jäätymistilanteessa. Tavanomaisilla betoneilla kriittinen vedelläkyllästysaste on yleensä 0,8 - 0,95. Betonin vaurioitumisnopeus on verrannollinen niiden jäätyriskertojen lukumäärään, jolloin jäätyminen tapahtuu kriittisen kyllästysasteen ollessa ylittyneenä. Talvella julkisivubetonin kuivuminen on hidasta alhaisesta lämpötilasta ja korkeasta ilman suhteellisesta kosteudesta johtuen. Näin ollen talvikautena on tavallista, että betoni pääsee jäätymään vedellä kyllästyneenä.

Betonin pakkasenkestävyys riippuu suurella määrällä betonissa olevien huokosten laadusta ja määrästä. Ulkopuolinen kosteus imeytyy pääasiassa kapillaarihuokosiin. Pakkasrapautumisen estämiseksi on betonissa oltava riittävän suuria ilmahuokosia, jotka eivät täyty kapillaarisella vedellä. Vesi voi jäätyessään laajeta näihin suojahuokosiin. Ilmahuokosten suhteellista osuutta kokonaishuokostilavuudesta sanotaan suojahuokossuhteeksi, joka voidaan kokeellisesti mitata kapillaarisen vedelläkyllästys- tai suojahuokoskokeen avulla. Suojahuokosten välimatka on oltava riittävän lyhyt ja niiden on oltava tasaisesti jakautuneena sementtikivessä. Tietyn suojahuokossuhteen omaavan betonin kriittinen vedelläkyllästysaste voidaan määrittää kokeellisesti jäädytys-sulatuskokeella, jossa kappaleiden kyllästysaste ei muutu kokeen aikana. Suojahuokoistus saadaan aikaan lisäainetta ns. lisähuokoistusainetta käyttämällä.

Betonin lujuuden kasvattaminen parantaa myös pakkasenkestävyyttä. Jäätymisvoimat ovat niin suuria, ettei suurikaan betonin lujuus pysty estämään säröjen syntymistä, mutta rapautumisnopeuteen lujuudella on suuri merkitys. Tämä johtuu siitä, että suuren lujuuden omaavalla betonilla on suuri lujuusreservi "rapautumisrajatilan" yläpuolella. Mitä suurempi tämä lujuusreservi on, sitä enemmän tarvitaan vaurioittavia jäätyksiä rapautumisrajatilan saavuttamiseen. Huokosrakenteesta riippuu siis miten herkästi ja kuinka usein vaurioittavia jäätymistilanteita syntyy, ja lujuudesta riippuu kuinka monta vaurioittavaa jäätymistilannetta betoni sietää, ennen kuin se menettää koossapysyvyytensä.

Pakkasrapautumisen edistymistä voidaan seurata silmämääräisesti elementtisaumojen välin muutosta tarkkailemalla. Elementtisaumat kapenevat pitkällä aikavälillä pakkasrapautumisen laajentaessa elementin ulkokuorta. Ulkokuoressa havaittavia muita muutoksia ovat elementtien käyristyminen ja pinnan halkeilu. Pitkälle edennyt pakkasrapautuminen elementtien reunoissa haurastaa betonia niin, että se hajoaa käsiin.

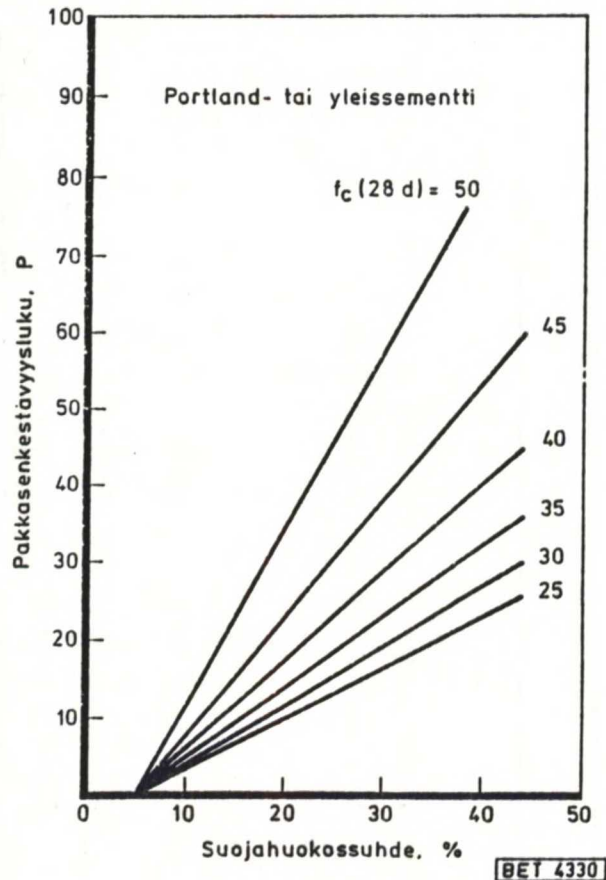
Rakenteen käyttöikä pakkasenkestävyyden suhteen voidaan teoreettisesti arvioida lähteessä /43/ esitetyillä menetelmillä, joista julkisivurakenteiden käyttöiän määrittämiseen parhaiten soveltuu tavanomaiseen jäädytys-sulatuskokeeseen perustuva suora pakkaskestävyyden määrittäminen ja sen avulla laskettu rakenteen käyttöikä.

$$t_1 = k_e^N \cdot N \quad (2.8.)$$

- t_1 = rakenteen käyttöikä
 k_e^N = olosuhdekerroin
 N = vaihejäädystyskokeessa niiden jäädystys-sulatuskierrosten lukumäärä, jotka aiheuttavat koekappaleiden vaurioitumisen edeltä määrätyn kriteerin mukaiseen vaurioasteeseen

Jäädystys-sulatuskokeen vauriokriteerinä voidaan käyttää lujuus-, kimmo- tai muita mekaanisia ominaisuuksia tai koekappaleen tilavuuden kasvua tai rapautumista. Käyttöiän arvioimisessa tulisi soveltaa samaa vauriokriteeriä, joka on rakenteissa käyttöiän suhteen määräävä. Olosuhdekerroin ilmaisee ympäristön pakkasrasituksen, ja sen lukuarvo on kytketty testausmenetelmään. Olosuhdekerroin voidaan yleensä arvioida vain likimääräisesti rakenteen ja ympäristön tyyppin perusteella, ja tiedot perustuvat kenttätutkimuksissa mitattuihin keskimääräisiin vaurionopeuksiin /43/.

Liitteessä /43/ on myös esitetty epäsuora laskentamenetelmä betonin käyttöiän määrittämiseksi, jossa materiaalitekijöiden osuus otetaan huomioon nk. pakkasenkestävyysluvun P muodossa. Pakkasenkestävyysluku riippuu betonin 28 d:n puristuslujuudesta ja suojahuokossuhteesta kuvan 2.11. mukaisesti. Olosuhdekertoimen arvot saadaan suoraan taulukosta 2.1.



Kuva 2.11. Pakkasenkestävyysluvun riippuvuus 28 d:n puristuslujuudesta ja suojahuokossuhteesta. Portland- tai yleissementti /43/.

Taulukko 2.1.

Olosuhdekertoimet eri ympäristöoloissa oleville rakenteille /42/.

| Rakenne | Olosuhdekerroin |
|-------------------------------|-----------------|
| Siltojen reunapalkit | 1,5 |
| Siltapilarit merivedessä | 1,5 |
| Siltapilarit makeassa vedessä | 3,5 |
| Padot, voimalaitosrakenteet | 3,5 |
| Parvekkeet, ulkoportaat | 5 |
| Julkisivut yleensä | 8 |

Käyttöikä saadaan kaavasta

$$t_1 = k_e \cdot P \quad (2.9.)$$

t_1 = rakenteen käyttöikä
 k_e = olosuhdekerroin
 P = pakkasenkestävyysluku

Menetelmässä pakkasenkestävyysluku on määritetty pakkas-suolakokeella. Olosuhdekerroin ottaa huomioon julkisivurakenteen eroavaisuudet suolarasituksen alaisiin betonirakenteisiin. Kuitenkaan menetelmä ei kuvaa julkisivurakenteiden pakkasenkestävyyttä yhtä hyvin kuin suolarasitettujen rakenteiden kestävyyttä. Muutoinkin pakkasenkestävyyden luvun ja kaavan 2.9. välistä yhteyttä on moitittu huonosta tarkkuudesta esimerkiksi lähteessä /42/.

Ennen vuotta 1976 rakennetuissa julkisivuelementeissä ei lisähuokoistusaineita juurikaan käytetty eikä ilmahuokoisuus aina ole riittävä pakkasenkestävyyden varmistamiseksi. Vaurioita näihin elementteihin ei välttämättä ole syntynyt, koska kosteusolosuhteet jäätymistilanteessa ovat olleet suotuisat.

Vuoden 1976 Betonin säilyvyys -ohje (BY 9) antoi suositukset betonin ilmamäärästä ja suoja-huokossuhteesta julkisivurakenteissa. Tämän jälkeen tehdyissä betonijulkisivuissa pakkas-vauriotapaukset ovat harvinaisempia. Uusia ongelmia pakkasenkestävyyden kannalta on jonkin verran aiheuttanut mm. lentotuhkan käyttö sementtiä korvaavana seosaineena. Valkobetonissa käytettävän kalkkikivirunkoaineen on oltava riittävän tiivistä, ettei se aiheuta pakkas-rapautumista.

2.3. KORJAUKSEN TARVE

Asuntohallituksen tutkimus- ja suunnitteluosasto on vuonna 1989 tehnyt tutkimuksen, jossa on kartoitettu betonielementtijulkisivujen vikoja ja vaurioita tutkimalla silmämääräisesti asuin-kerrostalojen julkisivuja /19/. Kohteena olivat Helsingin kaupungin omistaman asuinrakennus-kannan 1960- ja 1970-luvulla rakennetut elementtirakenteiset kiinteistöt, yhteensä 69 kiinteis-töä, joissa oli noin 330 rakennusta ja noin 540 000 m² elementtijulkisivuja. Rakennusten koko-naistilavuus oli 3.17 milj. m³.

Julkisivuissa esiintyi monenlaisia vaurioita, joista vakavimpana pidettiin betonin rapautumista. Useissa kiinteistöissä havaittiin julkisivupinnoissa näkyviin tulleita raudoitteita, halkeamia ja lohkeamia, elementtien käyristymistä ja pinnoitevikoja. Vain 27 % betonielementtijulkisivuista katsottiin virheettömiksi. Havaituista vioista 3/4 arveltiin olevan sellaisia, että ne voitaisiin korjata normaaleina vuosikorjauksina. Neljänneksessä vikojen laatu, syy tai etenemisnopeus aiheutti vuosikorjauksia vaativimpiin julkisivunkorjaustoimenpiteisiin ryhtymistä.

Tutkimuksen kattavuus on n. 5 % 1960- ja 1970-luvulla rakennetuista betonielementti-rakenteisista asuinkerrostaloista. Jos saatuja tuloksia yleistetään koskemaan koko elementti-rakenteista asuinkerrostalokantaa, niin saadaan seuraavia tuloksia: kun vuosina 1967-1979 rakennettiin asuinkerrostaloihin betonielementtijulkisivuja n. 10 milj. m²/44/, niin tutkimuksen mukaan tästä määrästä vajaa 2 milj. m² vaatisi vuosikorjauksia järeämpiä toimenpiteitä. Toisaalta on todennäköistä, ettei kaikkia niitä julkisivuja, joiden vauriot olisi vuosikorjauksilla voitu hoitaa (yli 5 milj. m²), ole korjattu vuonna 1989 tehdyn tutkimuksen jälkeen. Näin ollen suurempia korjaustoimenpiteitä vaativia julkisivuja saattaa olla jo edellä arvioitua enemmän.

Lähteen /43/ mukaisella terästen korroosioon perustuvalla betonin käyttöiän määrittelyllä ja eri aikoina käytettyjen betonilaatujen ja suojakerrospaksuuksien perusteella voidaan laskea teoreettisia korjausajankohtia eri ikäisille betonielementtirakenteille. Ennen vuotta 1977 käytetyn betonin lujuusluokka oli K25 ja suojaavan betonipeitteen paksuus 20 mm. Tällöin kuvasta 2.9. saatu käyttöikä on alle 25 vuotta, eli kaikki ennen vuotta 1977 rakennetut betonielementtitalot (yli 50 milj.m³ /44/) tulisi korjata ennen vuosituhannen vaihdetta. Arvio on tietenkin hyvin teoreettinen, ja vaikka se toteutuisikin, korjaustarve tulee varmasti aina olemaan suurempi kuin korjattavien talojen määrä.

Korjausrakentamisen markkamääräisiä arvoja on tutkittu KORVO-90 tutkimuksessa. Vuonna 1990 korjausrakentamisen arvo oli 21 mrd. mk. Ammattimaisten korjausrakentajien tekemien ulkoseinien pintakorjausten markkamääräinen arvo oli noin 500 milj. mk. 1990-luvun alkupuolella korjausrakentamisen arvo on alentunut heikon kansantaloudellisen tilanteen vuoksi, mutta sen oletetaan kasvavan vuoteen 2000 mennessä 25 - 30 mrd. markkaan vuoden 1990 rahassa mitattuna. Vastaavalla kasvulla urakoitsijoiden tekemien pintakorjausten arvo nousisi 600 - 700 milj. markkaan.

2.4. KORJAUSVAIHTOEHDOT

Valittaessa julkisivun korjausmenetelmää on peruskysymyksenä korjauksen optimaalinen ajankohta ja laajuus. Korjaustarpeen tyydyttävä, mutta mahdollisimman kevyt korjausmenetelmä on yleensä taloudellisin ja tarkoituksenmukaisin vaihtoehto. Edellytyksenä on, että myös vaurioiden syyt ja niiden jatkuminen voidaan poistaa. Periaatteena tulisi pitää sitä, että korjattavan julkisivun ja sen osien tekninen käyttöikä tulisi parhaalla mahdollisella tavalla hyödynnettyksi.

Karkeasti määritellen toimenpidevaihtoehtoja on viisi:

1. Ei tehdä mitään. Vaurioituminen saa edetä omaan tahtiinsa.
2. Hidastetaan vaurion etenemistä vähentämällä rasiustasoa (esim. korjataan pellitykset, saumat).
3. Korjataan vaurioituneet kohdat erilaisilla paikkauksilla ja pinnoitteilla.

4. Tehdään uusi pintarakenne vanhan päälle ja mahdollisesti lisäeristetään.
5. Puretaan ja rakennetaan uudestaan koko julkisivurakenne tai osia siitä.

Vaihtoehtoa 4. harkitaan esimerkiksi silloin, kun rakennuksen uusintapintakäsittelyn kestoikästä esiintyy epävarmuutta. Mahdollisesti pintakorjausten kestoikä on aiemmin jäänyt lyhyeksi, eikä enää haluta tehdä uutta pintakäsittelyä.

Jos korroosioaurioita betonielementtijulkisivussa on enemmän kuin paikallisesti, mutta ulko-kuoren kiinnitys sisäkuoreen toimii vielä sen verran hyvin, että ulkokuoren varsinaista putoamisvaaraa ei ole, on uuden pintarakenteen asentaminen vanhan päälle helpompi ja taloudellisempi vaihtoehto kuin julkisivurakenteen uudelleen rakentaminen. Elementtien ulkokuoren purkamiseksi ei vielä ole keksitty yksinkertaista nopeata menetelmää. Lisäksi uuden pintarakenteen toimiessa sadetakkina pääsevät vanhan seinän mahdollisesti kastuneet lämmöneristeet kuivumaan, ja vanhan seinän lämmöneristävyys paranee.

Uusi pintarakenne vanhan päälle tehdään usein myös silloin, kun julkisivumateriaali halutaan vaihtaa toiseksi. Vanha julkisivu saattaa olla sopimaton ympäristöönsä tai rakennuksen muuhun olemukseen, tai sitten uuden julkisivumateriaalin toivotaan parantavan rakennuksen tai asuinalueen arvoa.

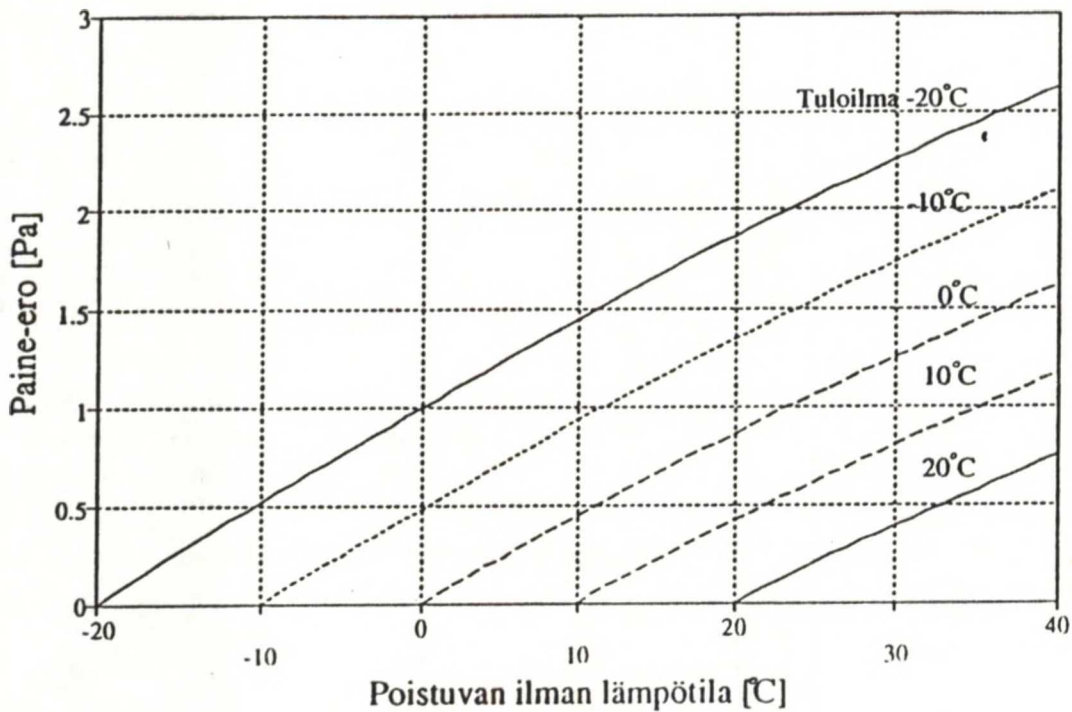
3. KEVYTRAKENTEISEN JULKISIVUKORJAUKSEN VAIKUTUKSET ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSIKAALISEEN TOIMINTAAN

3.1. TUULETTUVUUS

Kevytrakenteisissa julkisivukorjausmenetelmissä julkisivumateriaalin taakse jätetään tuuletusrako. Tuuletusraon pääasiallinen tehtävä ulkoseinärakenteessa on ylimääräisen kosteuden poistaminen ilmavirtausten avulla.

Tuuletusraossa syntyy luonnollisia ilmavirtauksia ulkoilman ja tuuletusraon ilman lämpötila-eroista johtuvien ilman tiheyserojen vuoksi. Tämän savupiippuvaikutuksen aiheuttamat paine-erot tuuletusraon päiden välillä ovat varsin pieniä.

Kuvasta 3.1. nähdään metrin matkalla tapahtuvan ilman lämpenemisen synnyttämä paine-ero. Eri korkuisissa tuuletusraoissa tapahtuvat paine-erot saadaan kuvasta kertomalla paine-ero raon korkeudella [m].



Kuva 3.1. Ilman lämpenemisestä aiheutuvan paine-eron suuruus tuloilman eri arvoilla metrin korkuisella matkalla /41/.

Tuuli aiheuttaa tuuletusrakoon ns. pakotetun ilmavirtauksen. Tuulesta aiheutuvat paine-erot tuuletusraon päiden välillä riippuvat rakennuksen osien muotokertoimista ja ovat yleensä suurempia kuin savupiippuvaikutuksen aiheuttamat. Pakotetun ilmavirtauksen suunta voi olla lisäksi päinvastainen kuin luonnollisen ilmavirtauksen, jolloin se voimakkaampana kumoaa savupiippuvaikutuksen.

Muotokerroin on rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta riippuva vakio. Se määritellään yleensä tuulen suunnan funktiona, eikä se ole koko tarkasteltavalle pinnalle vakio, vaan vaihtelee paikallisesti. Muotokertoimien arvoja on määritelty tunnelikokein pienoismallien ja käytännön mittauksilla myös todellisten rakennusten avulla. Paikallisten muotokertoimien määrittäminen kokeellisesti yksittäisille rakennuksille on kuitenkin vaikeaa, koska tuulen nopeus ja suunta vaihtelevat laajoissa rajoissa lyhyen aikavälin sisällä.

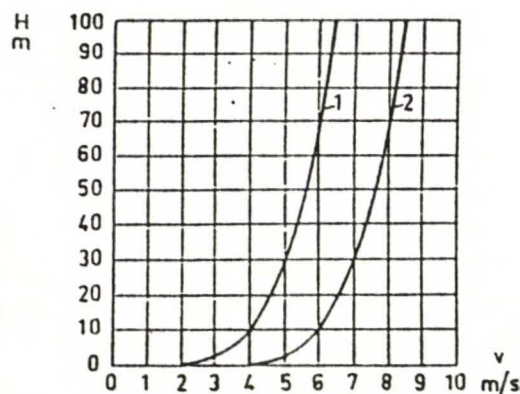
Lähteissä /5/ ja /39/ esitettyjen seinien paikallisten painekertoimien avulla voidaan laskennassa tarvittava muotokertoimien erotus määrittää. Lisäksi on huomioitava myös vaakasuunnassa olevat muotokertoimien erotukset, koska virtaukset voivat tapahtua myös vaakasuunnassa tuuletusraossa mahdollisesti olevien pystysaumojen kautta.

Säähavaintoasemien havaintojen mukaan tuulen vuotuinen keskiarvo on meren rannikkoalueilla ja aavoilla tuntureilla 5 - 7 m/s ja suurten vesistöjen rannoilla sekä korkeilla maastoalueilla 4 - 5 m/s. Sisämaassa tuulen vuotuinen keskiarvo on 3 - 4 m/s. Pitkäaikaisten tilastojen mukaan tuulen nopeuden keskiarvot kuukausittain erällä paikkakunnilla ovat taulukon 3.1. mukaiset.

Taulukko 3.1. Tuulen nopeuden pitkäaikaiset kuukausikeskiarvot (m/s) /1/.

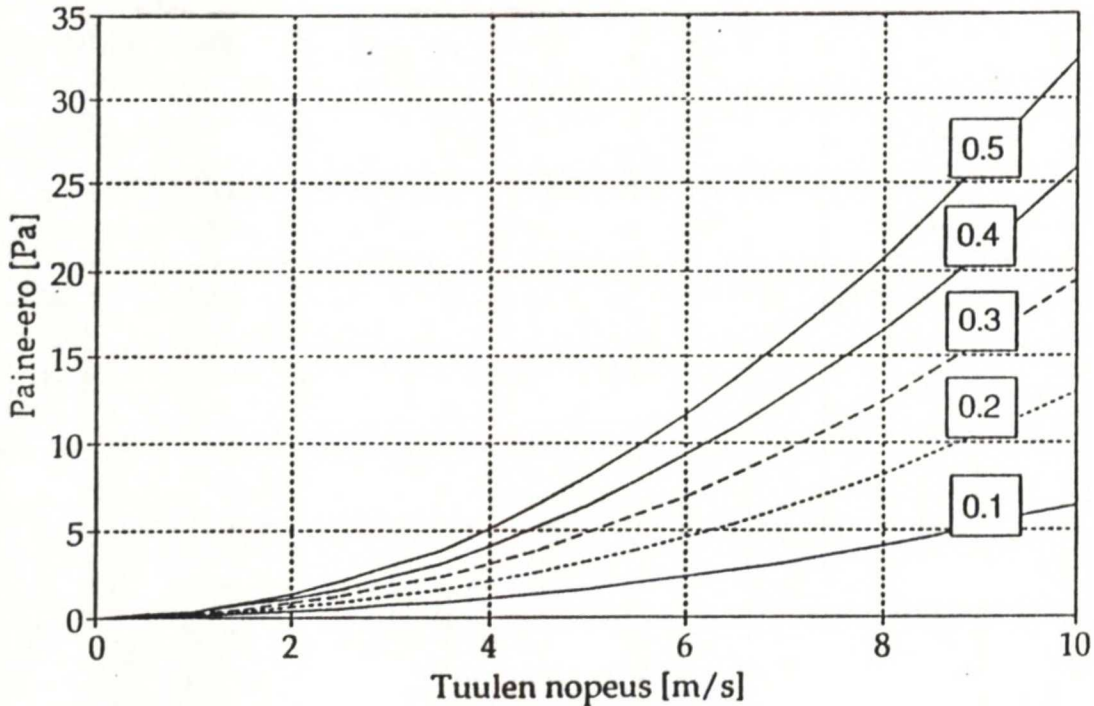
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Vuosi |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Helsinki | 4.3 | 3.5 | 5.9 | 3.9 | 4.6 | 3.9 | 2.7 | 3.3 | 3.6 | 3.8 | 4.7 | 4.5 | 4.1 |
| Jokioinen | 3.5 | 3.3 | 5.2 | 3.6 | 4.7 | 3.5 | 2.6 | 3.5 | 3.5 | 3.8 | 4.7 | 4.2 | 3.8 |
| Jyväskylä | 2.4 | 2.6 | 4.0 | 3.2 | 3.8 | 3.1 | 2.5 | 3.0 | 3.0 | 3.7 | 3.9 | 3.5 | 3.2 |
| Sodankylä | 2.3 | 3.2 | 3.5 | 2.7 | 4.0 | 3.5 | 3.2 | 2.9 | 3.1 | 3.9 | 3.4 | 3.2 | 3.2 |

Tuuliarvot mitataan kansainvälisen suosituksen mukaan 10 metrin korkeudessa ja ilmoitetaan 10 minuutin keskiarvona. Lähempänä maanpintaa tuulennopeus voi olla huomattavasti pienempi johtuen maanpinnan kitkavaikutuksesta ja vastaavasti tuulen nopeus kasvaa huomattavasti korkeuden kasvaessa. Puuskissa tuulen nopeus voi olla mitattua keskiarvoa huomattavasti suurempi. Kuvassa 3.2. esitetään keskimääräisen tuulen nopeuden riippuvuus korkeudesta normaalilla ja tuulisella seudulla Suomessa.



Kuva 3.2. Keskimääräisen tuulen nopeuden riippuvuus korkeudesta 1) normaalilla ja 2) tuulisella seudulla /41/.

Tuuletusraon päiden välille syntyvän paine-eron suuruutta erilaisilla tuulen nopeuksilla voidaan tarkastella kuvan 3.3. avulla. Kuvasta havaitaan, että normaaleilla tuulen nopeuksilla päiden välille syntyvä paine-ero jää pieneksi varsinkin käytettäessä muotokertoimien erotuksena arvoa 0.1, joka on varmalla puolella oleva arvio kerroksen korkuisen tuuletusraon päiden välille.



Kuva 3.3. Muotokertoimien erotuksen vaikutus tuulen aiheuttamaan paine-eroon /41/.

Tuulettomalla säällä auringon säteilyn vaikuttaessa verhouksen lämpötilat samoin kuin tuuletusraon ilman lämpötila saattavat olla ulkolämpötilaa huomattavasti korkeammat. Tällöin savupiippuvaikutus voimistuu, ja sen aiheuttama paine-ero rakojen päiden välillä voi kasvaa tyypillisestä alle 0,5 Pa:n arvosta jopa suuremmaksi kuin normaalien tuulten nopeuksien aiheuttamat paine-erot. Tähän vaikuttavat auringon säteilyn lisäksi verhouspinnan väri ja sisältä ulkoseinän läpi tuuletusrakoon johtuva lämpöenergia. Tummiin verhouspintojen lämpötila saattaa poiketa ulkoilman lämpötilasta jopa useita kymmeniä asteita.

Auringon säteily on voimakasta varsinkin rakennuksien eteläseinillä, joille osuva säteily on huomattavasti suurempaa kuin muilla ilmansuunnilla. Pohjoisseinillä säteily on hyvin vähäistä talvella säteilyn ollessa maksimissaankin vain n. 1/5 eteläseinille tulevasta säteilymäärästä. Lisäksi pilvisyyden vaikutus on huomattava, sillä esimerkiksi Helsingissä on pilvistä n. 80 % tammikuusta. Savupiippuvaikutuksen huomioiminen virtauksien laskennassa onkin syytä tehdä ainakin tuuletusraon lämpöteknisen toiminnan pitkäaikaistarkasteluissa pääosin ilman auringon säteilyn huomioon ottamista, jotta saadaan varmalla puolella olevia arvoja.

Tuuletusraossa tapahtuvat painehäviöt muodostuvat pääosin tuuletusraon muodon ja koon muutoksien aiheuttamista kertahäviöistä, lähinnä sisääntuloaukon kertahäviöistä.

Tuuletusraon leveyden ja korkeuden vaikutusta virtauksiin on tutkittu lähteessä /41/. Tarkasteluiden perusteella on osoitettavissa tuuletusraon avonaisten päiden pinta-alan merkitys painehäviöihin. Tärkeä vaikuttaja on myös tuuletusraon paikalliset supistumat, joiden merkitys on suuri, jos supistuman aukon pinta-ala on pieni verrattuna tuuletusraon pinta-alaan tai jos supistumia on useampia. Tuuletusraon pituudella on vaikutusta ainoastaan tuuletusraon kitkahäviöön, jonka osuus kokonaishäviöistä suurenee pituuden kasvaessa. Kitkahäviö on merkittävä tekijä lähinnä kapeissa tuuletusraoissa (alle 20 mm).

Lähteessä /41/ todettiin myös, ettei raon leveyden suurentaminen 20 mm:stä 30 mm:iin juurikaan paranna tuuletusraon tuulettuvuutta kuin ainoastaan korkeilla tuuletusraoilla.

Tuuletusraon kosteusteknisen toiminnan välttämätön edellytys on riittävä ilmanvaihto ympäristön kanssa. Tämä ei kuitenkaan riitä, sillä tuuletusrako pystyy poistamaan rakenteesta kosteutta vain, jos tuuletusraossa virtaavan ilman sisältämä vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin vesihöyrypitoisuus rakenteen pinnalla. Tuuletusraon lämpötilat ja tuuletusrakoon tulevan ilman lämpötila vaikuttavat merkittävästi siihen, toimiiko tuuletusrako rakennetta tuulettavasti vai tuleeko tuuletusraon kautta lisää kosteutta rakenteeseen. Jos tuuletusrako on lämmin verrattuna sisäänvirtaavaan ilmaan, johtaa tämä yleensä rakenteen kuivumiseen. Jos sitävastoin tuuletusrako on kylmä verrattuna sisäänvirtaavaan ilmaan, voi kosteus tiivistyä tuuletusraossa rakenteen pintaan.

Julkisivuverhouksen taakse jäävän tuuletusraon paksuudelle ei ole Suomessa annettu erillisiä määräyksiä, mutta esimerkiksi metallikasetteja käsittelevän RT-ohjekortin RT 82-10429 mukaan tuuletusraon tulisi olla leveydeltään vähintään 25 mm. Puu- ja mineraalipohjaisen julkisivulevyn osalta RT-tarvikekortissa RT R-33007 mainitaan tarvittavaksi tuuletusraon leveydeksi vähintään 22 mm. Tuuletusväliä ei saa katkaista vaakasuorilla rakenteilla, ja verhoukslevyjen tai -kasettien asennuksessa on huolehdittava ettei tuulettumista estäviä roskia joudu tuuletusrakoon.

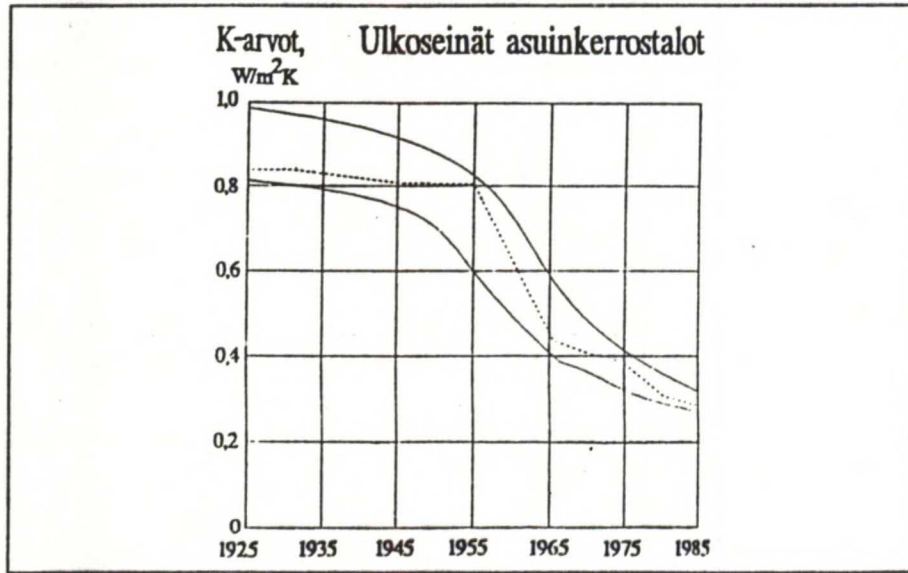
Saksan normeissa (DIN 18 516) on annettu tuuletusraon leveydelle ohjeellinen vaatimus, että sen tulisi olla vähintään 20 mm. Paikallisesti saa tuuletusraon leveys taustarakenteen tai verhouksen epätasaisuuden vuoksi olla 5 mm. Tuuletusraon sisään- ja ulosvirtausaukkojen poikkileikkauksen tulisi olla vähintään $50 \text{ cm}^2/\text{m}$, joka vastaa koko seinän levyistä 5 mm leveää rakoa. Pienikokoisten, alle 0.4 m^2 verhoukslevyjen tapauksessa (DIN 18 517) voi tuuletusraon leveys olla 10 mm verhouksen saumojen runsauden vuoksi.

3.2. LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA

3.2.1. LISÄLÄMMÖNERISTYS

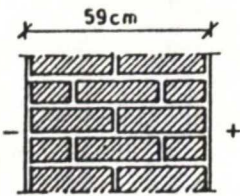
Rakenteen lämmöneristyskykyä kuvaa lämmönläpäisykerroin eli k-arvo. Ulkoseinien k-arvot ovat vuosien kuluessa parantuneet massiivisen tiiliseinän tasolta vähitellen lämmöneristettä lisäten 50 - 60-luvuilla ja lähestyen nykyisiä k-arvovaatimuksia 70-luvun puolivälissä. Kuvasta 3.4. nähdään keskimääräisen lämmönläpäisykertoimen kehittyminen asuinkerrostaloissa.

Kuvassa 3.5. on esitetty tyypillisiä suomalaisissa kerrostaloissa esiintyviä ulkoseinärakenteita ja taulukossa 3.2. on annettu näiden rakenteiden k-arvot.

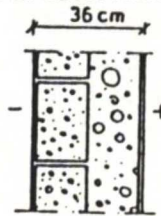


Kuva 3.4. Ulkoseinien keskimääräinen lämmönläpäisykerroin rakentamisvuoden mukaan asuinkerrostaloissa /20/.

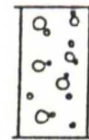
KAHDEN KIVEN
SAVITIILISEINÄ



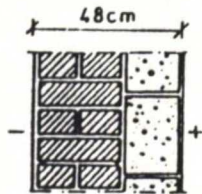
SEINÄ HÖYRYKARKAISTUSTA
KEVYTBETONISTA JA BETONISTA



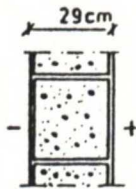
UMPIBETONI



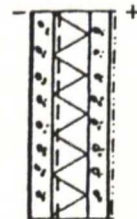
YHDEN KIVEN
SAVITIILISEINÄ JA
KEVYTBETONI



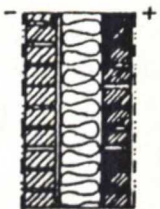
SEINÄ HÖYRYKARKAISTUSTA
KEVYTBETONISTA



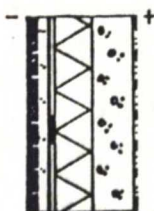
SANDWICH-
TERÄSBETONI-
ELEMENTTI



TIILISEINÄ JA
MINERAALIVILLA-
ERISTYS



KANTAVA
BETONIELEMENTTI



Kuva 3.5. Tyypillisiä kerrostalojen ulkoseinärakenteita Suomessa.

Taulukko 3.2.

Kuvassa 3.5. esiintyvien ulkoseinärakenteiden k-arvot.

| Seinärakenne | | k-arvo (W/m ² K) |
|---|--------------------|--------------------------------|
| Kahden kiven savitiiliseinä | | 0,96 |
| Seinä höyrykarkaistusta kevytbetonista ja betonista | | 0,83 |
| Umpibetoniseinä | paksuus 150 mm | 2,88 |
| | 250 mm | 2,45 |
| | 350 mm | 2,16 |
| Yhden kiven savitiiliseinä ja kevytbetoni | | 0,64 |
| Seinä höyrykarkaistusta kevytbetonista | | 0,61 |
| Sandwich-teräsbetonielementti | lämmöneriste 75 mm | 0,47 |
| | 100 mm | 0,37 |
| | 125 mm | 0,30 |
| Tiiliseinä ja mineraalivillaeristys | lämmöneriste 75 mm | 0,53 |
| | 100 mm | 0,44 |
| | 125 mm | 0,37 |
| Kantava betonielementti | lämmöneriste 75 mm | 0,46 |
| | 100 mm | 0,36 |
| | 125 mm | 0,30 |

Massiivisen seinärakenteen, kuten betoni- ja tiiliseinän, k-arvo ei anna oikeaa kuvaa todellisesta lämmöneristyksestä. Vaikka massiivirakenteen k-arvo on nykyvaatimukseen nähden huono, on lämmöneristyskyky yleensä hyvä johtuen yhtenäisen rakenteen lämmönvarauskyvystä.

Lisälämmöneristäminen on yleensä aina harkittavana julkisivun uudelleenverhoilun yhteydessä. Lisälämmöneristyksellä parannetaan alkuperäisen rakenteen lämmöneristyskykyä. Toimivan lisälämmöneristuksen edellytyksenä on hyvin suunnitellut ja toteutetut rakenteet, sillä rakenteen kosteustekninen toiminta muuttuu lisälämmöneristämisen yhteydessä.

Kevytrakenteisen julkisivukorjauksen yhteydessä tulee yleensä kyseeseen ulkopuolinen lisälämmöneristys, joka nostaa vanhan rakenteen lämpötiloja ja näin ollen vesihöyryn kondensoitumisriski rakenteessa pienenee. Ulkopuolinen lisäeristys katkaisee lisäksi tehokkaasti välipohjien ja -seinien muodostamat kylmäsilat.

Sisäpuolinen lisäeristys vaikuttaa seinään lähes päinvastaisesti: se alentaa rakenteen lämpötilaa ja voi sen vuoksi aiheuttaa kondensoitumista ja pakkasvaurioita. Siksi sitä ei normaalisti suositella julkisivun korjausten yhteydessä tehtäväksi lisälämmöneristykseksi. Jatkossa käsitelläänkin ainoastaan ulkopuolista lisälämmöneristystä.

Lisälämmöneristyksellä saavutettava lämpötekniinen hyöty voidaan arvioida karkeasti normaaliin k-arvon käsinlaskentamenetelmien avulla. Näin on tehty luvussa 5.3.2. tuuletusraoillisen levykorjausmenetelmän tapauksessa, jossa kiinnitysorsina käytetään puisia 50 x 50 mm rimoja 600 mm välein. Tavanomainen k-arvolaskenta ei kuitenkaan ota huomioon kylmäsiltojen vaikutuksia, joiden merkitys varsinkin metallisia kiinnityskappaleita ja kiinnitysorsia käytettäessä on suuri. Rakenteissa mahdollisesti esiintyvien teräsosien lämmönjohtavuus on yli 1000-kertainen ja mahdollisten alumiiniosien yli 4000-kertainen lämmöneristeiden lämmönjohtavuuteen nähden.

(puun lämmönjohtavuus on n. 3-kertainen lämmöneristeeseen nähden), jolloin normaaleja käsinlaskentamenetelmiä ei voi käyttää. Parempaan tulokseen päästään käyttämällä ATK-menetelmiä, joista mm. elementtimenetelmään perustuvia laskentaohjelmia on yleisesti käytössä.

Tyypillisiä kylmäsiltoja ovat ikkunoiden ja ovien liittyminen ulkoseinään, sekä parvekkeet ja rakennuksen nurkat. Ikkunapielien vaikutus lisäeristetyssä tapauksessa riippuu siitä, eristetäänkö myös pielet asiallisesti. Kylmäsilat mitätöivät lisäeristämisen teoreettisesta eristysvaikutuksesta vähintään 20 %, pahimmillaan puolet. Niihin siis tulisi kiinnittää suunnittelussa erityistä huomiota. Taulukossa 3.3. on tyypillisen 60-luvun lamellitalon kylmäsiltojen määrällä lasketut k-arvot ja kylmäsiltojen vaikutus näihin ennen ja jälkeen lisäeristämisen.

Taulukko 3.3. Kylmäsiltojen vaikutus todelliseen k-arvoon /8/.

| | Alkuperäinen | Lisäeristetty |
|-----------------------|--------------|---------------|
| Seinän k-arvo | 0,40 | 0,22 |
| Ikkunapielet | + 0,03 | + 0,02-0,11 |
| Parvekeliihtymät | + 0,015 | + 0,025 |
| Nurkat | + 0,005 | + 0,005 |
| Keskimääräinen k-arvo | 0,44 | 0,27-0,36 |

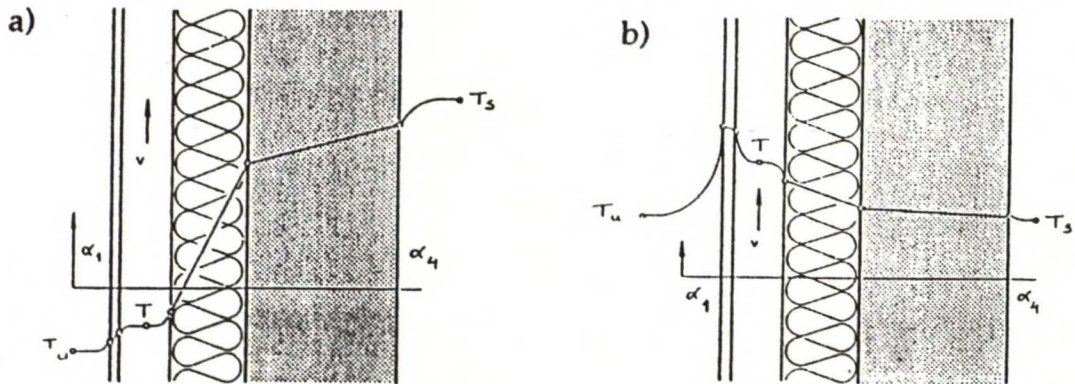
Lisälämmöneristyksessä pintaverhouksen ja lisälämmöneristeen väliin jää tuuletusrako. Aivan kuten uudisrakentamisessakin on lämmöneristeen pinnalle asennettava tuulensuoja, sillä muutoin ilmavirtaukset kulkevat myös lämmöneristeessä huonontuen eristävyttä huomattavasti.

Lähteessä /15/ on tutkittu ilmavirtausten vaikutusta rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksen mukaan rakenteen lämmönjohtavuus kasvaa ja eristävyys huononee ideaaliseen tapaukseen nähden rakenteessa olevien kerrosten lisääntyessä, sillä ainekerrosten väliin jääviin rakoihin syntyy luonnollisia ilmavirtauksia. Samasta syystä rakenteeseen huolimatoman työn seurauksena jääneet ilmaraot huonontavat lämmöneristävyttä merkittävästi. Siksi on tärkeää, että lisälämmöneristys tehdään yhtenä kerroksena, ja että eristystyössä noudatetaan huolellisuutta, jotta eristeen ja sen takana olevan seinäpinnan väliin ei jää ilmarakoa.

3.2.2. TUULETUSRAON VAIKUTUKSET

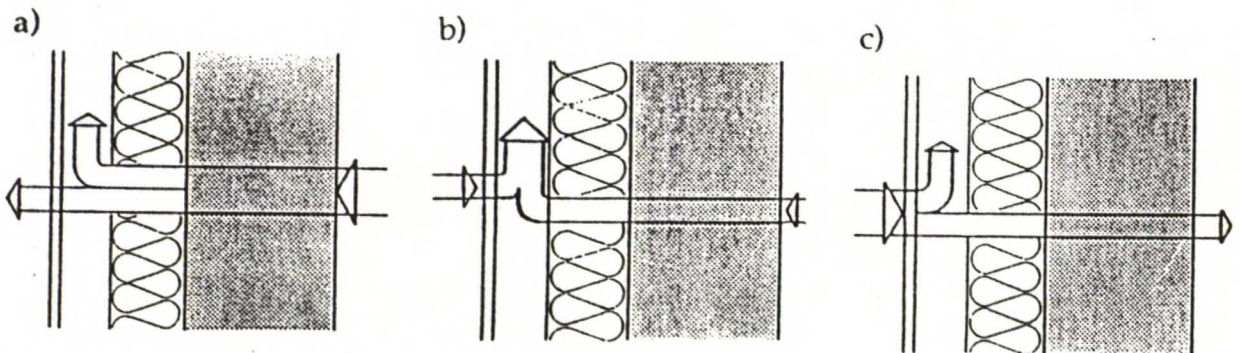
Lisälämmöneristeen ulkopuolisena rakenteena tuuletusrako ja sen ulkopuolelle asennettava verhoisuus parantavat rakenteen lämmöneristyskykyä, ja seinärakenteen k-arvo muodostuu pienemmäksi kuin laskettaessa Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti pelkän lisälämmöneristeen vaikutus.

Tuuletusraon vaikutus seinän lämpötekniiseen toimintaan riippuu voimakkaasti ulkoilman säätalasta. Tuuletusraon rakenteen periaatteelliset lämpötilajakaumat talvi- ja kesäolosuhteissa on esitetty kuvassa 3.6. Talviolosuhteissa ei ole otettu huomioon auringon säteilyn lämmittävää vaikutusta. Auringon säteilyn vaikuttaessa verhouksen pintalämpötilat ja tuuletusraon ilman lämpötila saattavat olla huomattavasti korkeammat kuin ulkolämpötila. Tuuletusraon ilman lämpötilaan vaikuttaa kuitenkin ratkaisevasti ilman virtausnopeus raossa.



Kuva 3.6. Tuuletusraollisen rakenteen periaatteelliset lämpötilajakaumat a) talvella ja b) kesällä /41/.

Lämmön siirtyminen tuuletusraollisessa rakenteessa voidaan jakaa kolmeen eri tapaukseen kuvan 3.7. mukaisesti.



Kuva 3.7. Lämmön siirtyminen tuuletusraollisen rakenteen läpi. a) talviolosuhteet, ei säteilyä, b) talviolosuhteet, voimakas auringon säteily, c) kesäolosuhteet /41/.

Julkisivumateriaalin lämpötilaan vaikuttaa auringon säteilytehon ja ilman lämpötilan lisäksi pinnan säteilyn absorptio- ja heijastusominaisuudet, jotka riippuvat pintamateriaalista, tummuusasteesta ja verhouslevyn tai -kasetin muotoilusta. Tummuusaste riippuu pintakäsittelystä ja ajan vaikutuksesta. Julkisivun verhouslevyille säteilyn absorptiokerroin on väristä ja materiaalista riippuen 0,2 - 0,9 ja emissiokerroin keskimäärin 0,9.

Yksi tuuletusraon merkittävä tehtävä on tuulen aiheuttamien paine-erojen taseus ulkoseinällä. Paine-erojen tasoittuminen vähentää ulkoseinärakenteen sisäisiä rakennevirtauksia esim. lämmöneristyksissä ja virtauksia rakenteen läpi parantaen näin ulkoseinän lämmöneristävyyttä.

3.2.3

VAIKUTUKSET JULKISIVUJEN ENERGIATALOUDELLISUUTEEN

Rakennuksen lämpöenergian kulutusta voidaan arvioida lämpöindeksin avulla. Lämpöindeksi on rakennuksen mitattu, todellinen ominaiskulutus, joka on normeerattu paikkakunnan aste-päiväluvulla vertailukelpoiseksi eri vuosien ja muiden talojen kanssa. Lämpöindeksi riippuu sijainnin ohella rakennuksen teknisten ratkaisujen lämpöteknisistä ominaisuuksista. Rakennuksen energiankulutus on suuri, jos sen ominaiskulutus nousee tasolle 70-100 kWh/rm³ vuodessa. Asuinkerrostalojen keskimääräinen hyötyenergiankulutus on vuodessa 65-70 kWh/rm³. Säästäväisimmissä taloissa päästään alle 50 kWh/rm³. Keskimääräisestikin energiaa kuluttavissa taloissa on yleensä mahdollisuuksia säästöihin, jos niin halutaan.

Rakennuksen lämmönkulutusta voidaan analysoida laskennallisesti. Rakennuksen vaipan eri osien, ts. yläpohjan, ulkoseinien, ikkunoiden ja ovien sekä alapohjan lämmönkulutusjakauma voidaan karkeasti laskea rakenteiden pinta-alojen, lämmönläpäisykertoimien (k-arvojen) ja paikkakunnan astetuntiluvun avulla. Ilmanvaihdon lämmönkulutus voidaan laskea talon sisäkuutioiden, ilman vaihtuvuuden, astetuntiluvun ja ilman lämpösisällön avulla. Lopuksi voidaan arvioida lämpimän veden vaatima energia veden kulutuksen, lämpimän veden osuuden ja sen lämmitystarpeen avulla. Suurimmat lämmönkulutuskohteet ovat parhaita säästökohteita.

Asuinkerrostaloissa vaipan johtumishäviöt muodostavat lämpöenergian kokonaiskulutuksesta keskimäärin hieman yli 40 %. Ulkoseinien osuus vaipan johtumishäviöistä on noin yksi kolmasosa. Vanhassa rakennuskannassa ulkoseinien johtumishäviöiden merkitys on jonkin verran keskimääräistä suurempi, koska ne ovat eristystasoltaan selvästi huonompia ja ilmanvaihdon määrä rakennuksessa on pienempi.

Erilaisten korjaustoimenpiteiden osalta voidaan niiden kannattavuuksia energian säästön näkökulmasta arvioida laskemalla korjauksen toteutuskustannukset ja vastaavat säästövaikutukset. Lisäeristäminen parantaa rakenteen k-arvoa, jonka teoreettinen muutos voidaan laskea tavanomaisen k-arvolaskelman avulla.

Lähteessä /8/ on tehty laskelmia siitä, onko taloudellisesti kannattavaa lisäeristää ulkoseinärakenne, kun julkisivu joudutaan jokatapauksessa uusimaan. Laskelmat on tehty vuosikustannuslaskelmana, jossa rakentamiskustannukset otetaan huomioon vain lisäeristyskerroksen osalta ja säästöinä huomioidaan lisäeristämällä saavutettu energiansäästö. Käytetty korkokanta on 4 % ja laskentajakson pituus on 40 vuotta. Ulkoseinien lisälämmöneristämällä saavutettavaksi säästöpotentiaaliksi on arvioitu 5-15 % koko asuinkerrostalon lämmönkulutuksesta. Rahallisen säästön suuruus riippuu energian paikkakunta-kohtaisesta hinnasta. Suomessa paikkakunta-kohtaiset erot lämpöenergian hinnassa ovat yllättävän suuria. Paikkakunnilla, joilla lämmitysenergian hinta on korkea, on lisäeristämisen säästöpotentiaali suurempi. Etelä-Suomen lämmönkulutuksella ja 15 p/kWh:n lämpöyksikön kustannuksella voidaan betonielementtiseinän eristämällä nykyvaatimusten tasolle saavuttaa säästöä 3,3 mk/m² vuodessa. Vastaava säästö kevytbetoniseinälle on keskimäärin 5 mk/m².

Kyseisissä laskelmissa lisäeristämisen katsottiin nostavan pääomakustannuksia 4 - 7 mk/m² vuodessa, joten betonielementtiseinien lisäeristäminen olisi tuskin kannattavaa. Kannattavuuden rajoille päästäisiin, jos korkokanta olisi 2 % tai jos lämpöyksikön kustannuksena olisi 20 p/kWh. Kevytbetoniseinän lisäeristäminen puolestaan saattaa olla kannattava vaihtoehto.

Yleisesti voidaan todeta, ettei julkisivun lisäeristäminen ole nykyisillä energian hinnoilla yksityistaloudellisesti kannattavaa. Kuitenkin vaurioituneen julkisivun lisälämmöneristäminen kevytrakenteisten korjausten yhteydessä on aina suotavaa, jotta julkisivun lisävaurioituminen voidaan estää.

Vaikka energian hinta ei tällä hetkellä ole kovin korkea, niin on todennäköistä, että se tulee nousemaan rajusti talon käyttöaikana. Jo nyt kylmimpinä vuodenaikoina tuotetun ns. huippuenergian kustannukset ovat 2-3 kertaa korkeammat kuin kuluttajalta perittävät keskimääräinen energian hinta. Sähkölämmityksen lisääntyessä huippuenergian hintaa on pakko nostaa jossakin vaiheessa. Talonomistaja maksaa sen silloin.

Rakennuksen energialaskun pienentämiseksi on olemassa myös muita keinoja, jotka kannattaa toteuttaa ennen lisäeristämistä tai viimeistään samalla kertaa. Näitä ovat mm. termostaattisten patteriventtiilien asennus, patteriverkoston säätö, ikkunoiden tiivistäminen jne. Julkisivu lisäeristetään vain, jos se on muutenkin korjaamisen tarpeessa.

Käytännön kokemukset lämmönsäästövaikutuksista ovat vaihtelevia mm. koska toimenpidettä tukevien säätötoimien suorittaminen on usein laiminlyöty.

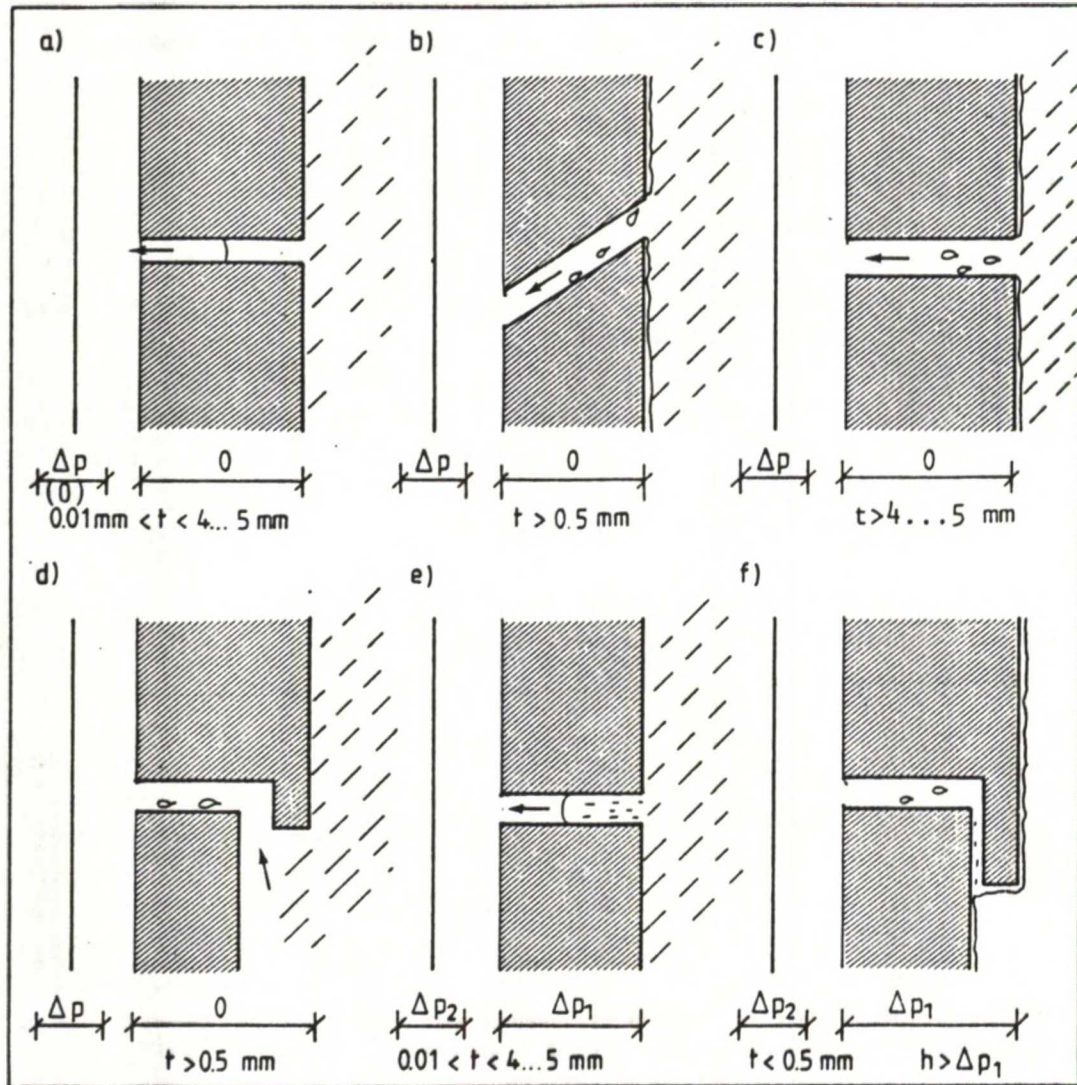
3.3. KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

3.3.1. SADETIIVIYS

Julkisivuverhouksen tehtävänä on estää sadeveden tunkeutuminen ulkoseinärakenteeseen. Tiivis verhouksmateriaali on erittäin hyvä ulkoseinän sadetakkina, joten tärkein merkitys on verhouksen vaaka- ja pystysaumoilla, mahdollisilla kiinnitysrei'illä ja liittymiskohdilla muihin pintarakenteisiin. Tuuli pyrkii tunkemaan julkisivupinnalle muodostuneesta vesikalvosta vettä verhouksen aukkojen läpi, ja vesi voi siirtyä kapillaarisesti verhouksessa olevien rakojen kautta. Lisäksi voivat sadepisarat kineettisen energiansa vaikutuksesta tunkeutua saumoista verhouksen taakse. Avoimien saumojen leveyden merkitys sateen tunkeutumiseen esitetään kuvassa 3.8.

Tuuletusraolisen julkisivuverhouksen ajatellaan yleensä toimivan kaksivaihetiivistyksen periaatteiden mukaisesti. Varsinainen verhouk estää sateen tunkeutumisen syvemmälle rakenteeseen, mutta se ei muodosta ilmanpitävää kerrosta, ja verhouksen yli vaikuttavat paine-erot pääsevät tasaantumaan tuuletusraon ansiosta. Jos paine-eroa verhouksen yli ei ole, ei myöskään sadevettä kulkeudu paineesta johtuvista syistä verhouksen taakse. Ulkoseinän ilmanpitävä kerros muodostuu tuuletusraollessa rakenteessa varsinaiseen seinärunkoon.

Verhouksen vaakasaumat ovat sateenpitävyyden kannalta merkittävämpiä kuin pystysaumat, ja niiden suunnitteluun on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Pystysaumoissa vesi voidaan johtaa helposti alaspäin estämällä veden suoranainen kulkureitti taustarakenteeseen. Saumarakenteissa tulee välttää verhoiltavaan seinärakenteeseen päin kaltevia pintoja, jotka johtaisivat sadeveden julkisivuverhouksen taakse. Rakenteet eivät saa myöskään muodostaa vaakasuoria kouruja tai ns. taskuja, joihin verhouksen taakse päässyt vesi voisi kerääntyä. Verhouksen kiinnikkeiden tulee olla muotoilultaan ja sijainniltaan sellaiset, ettei sadevesi niitä pitkin pääse kulkeutumaan syvemmälle rakenteeseen, esim. lisälämmöneristeeseen.



Kuva 3.8. Sateen tunkeutuminen seinärakenteeseen /38/.

- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| a) Kapillaari-imu | d) Ilmavirta |
| b) Painovoima | e) Paine-ero |
| c) Liike-energia | f) Kapillaari-imu ja paine-ero |

Verhouksen taakse kulkeutuvien vähäistenkin vesimäärien on voitava vapaasti poistua takaisin julkisivupinnalle tuuletusraon aukkojen kautta. Vedenpoisto voidaan järjestää esim vesipeltien tai vedenpoistoreikien avulla. Vedenpoisto verhouksen takaa on tärkeää myös mahdollisen rakennuksen sisältä tulevan kylmään verhouspintaan tiivistyneen kosteuden poistamiseksi.

Vapaan viistosateen määrä voidaan laskea käyttämällä Laceyn antamaa yhtälöä

$$S_{vv} = 0,222 \cdot v \cdot s^{0,88} \quad (3.1.)$$

S_{vv} = vapaa viistosade (mm)

v = tuulen nopeus (m/s)

s = sademäärä (mm)

Erityyppisten ja sijainniltaan erilaisten rakennusten viistosaderasitukset voivat vaihdella paljon. Samoin yhden rakennuksen osalta viistosademäärät vaihtelevat eri julkisivuilla.

Lähteessä /6/ on annettu suuruusluokkaa osoittavina arvioina seinän yläosaan kohdistuvista viistosateista Suomen oloissa seuraavat luvut:

- 50 - 100 mm/m² vuodessa keskimäärin
- 25 - 50 mm/m² syksyllä keskimäärin
- 2 - 4 mm/m² tavanomaisilla viistosateilla
- 10 - 20 mm/m² erittäin voimakkailla viistosateilla avoimella paikalla.

VTT:n tekemässä tutkimuksessa koetaloista /14/ ei löydetty selviä tuulen suunnan ja nopeuden sekä viistosademäärän välisiä yhteyksiä. Samoin ei paine-erojen ja viistosademäärän välille löydetty yhteyttä. Tutkimuksen mukaan viistosademäärät olivat suurempia rakennuksen nurkissa kuin suorilla seinän osilla.

3.3.2. TUULETUSRAON VAIKUTUKSET

Tuuletusraon ensisijainen tehtävä verhotussa rakenteessa on poistaa ylimääräinen kosteus, jota tuuletusrakoon voi tulla diffuusiolla tai konvektiolla taustarakenteen läpi.

Diffuusio aiheutuu vesihöyrypitoisuuksien erosta rakenteen eri puolilla. Tämä potentiaaliero lausutaan vesihöyryn osapaine-erona Δp (Pa). Konvektiolla tarkoitetaan tuulen, termisen vaikutuksen tai mahdollisen koneellisen ilmanvaihdon aiheuttaman rakenteen yli vallitsevan paine-eron aiheuttamia ilmapuotoja rakenteiden läpi. Suurimmillaan nämä vuodot ovat erilaisen saumojen, halkeamien, rakojen ja reikien kohdalla. Ilmavirtaus siirtää mukanaan ilmassa olevaa kosteutta ja ulkoseinän kosteusteknisen toiminnan kannalta vaurioalttiimpia ovat ne ulkoseinän alueet, joiden kohdalla rakennuksessa vallitsee ylipaine ulkoilmaan nähden. Nämä alueet sijaitsevat ns. neutraaliakselin yläpuolella. Ilman mukanaan kuljettamat kosteusmäärät ovat usein moninkertaisia diffuusiolla siirtyvään kosteuteen nähden.

Tuuletusrakoon voi myös tunkeutua vettä tai lunta voimakkaan tuulen ja vesi- tai lumisateen vaikutuksesta. Lumi voi tukkia tuuletusraon tuuletusaukot, jolloin tuuletusraon virtaukset estyvät ja kosteuden poistuminen tuuletusraosta heikkenee. Huomattava kosteusliisa tuuletusrakoon voi aiheutua myös taustarakenteen rakennusaikaisesta kastumisesta ja rakennekosteudesta.

Tuuletusraon kosteudenpoistokykyyn vaikuttaa ensisijaisesti tuuletusraon virtauksien suuruus. Virtausteknisesti väljän tuuletusraon virtaukset pystyvät todennäköisesti kuljettamaan ylimääräisen kosteuden pois, kun taas runsaasti supistumia sisältävässä tuuletusraossa virtaukset voivat olla liian pieniä. Tuuletusraon kosteudenpoistokykyyn tarkastelemiseksi tuleekin ensin selvittää tuuletusraon ilman virtausnopeus halutuissa olosuhteissa.

Virtausnopeuden lisäksi kosteudenpoistokykyyn vaikuttavat tuuletusrakoon tulevan ilman kosteuspitoisuus ja ilman lämpeneminen raossa. Tuuletusrako pystyy poistamaan kosteutta vain, jos tuuletusrako on lämpimämpi kuin sisään virtaava ilma. Kosteuden tiivistymistä rakoon voi tapahtua, jos sisään virtaavan ilman lämpötila on suurempi kuin tuuletusraon lämpötila. Pystysuorilla tuuletusraoilla oletetaan kuitenkin yleensä tuuletusraon pintojen lämpötilojen olevan alimmillaan ulkolämpötilan mukaisia. Jotta tuuletusraon ilma pystyisi sitomaan itseensä kosteutta tulee vesihöyrypitoisuuden rakenteen pinnassa olla suurempi kuin tuuletusraon ilman

vesihöyrypitoisuus. Tuuletusraosta poistuvan ilman vesihöyrypitoisuus voi olla korkeintaan ulkoilman kyllästystilan vesihöyrypitoisuuden suuruinen.

Tuuletusrako toimii verhouksmateriaalin takana eräänlaisena paineentasajana ja tarkoituksena on aikaansaada sama ilmanpaine verhouksen molemmille puolille. Tällaisessa tapauksessa paine-ero ei pääse tunkemaan sadevettä verhouksen saumojen läpi. Tuuletusrako toimii siis ns. kaksivaiheittävyyden osana, jonka lisäksi taustarakenteen tulee olla ilmatiivis.

Tuuletusraon kosteusteknisen toimivuuden edellytyksenä on taustarakenteen suunnittelu sellaiseksi, ettei taustarakenteen sisälle tiivisty kosteutta, vaan kosteuden tulee siirtyä rakenteesta tuuletusrakoon.

3.4. LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN MITOITUS

3.4.1. YLEISTÄ

Tuuletusraon toiminnan selvittämiseksi on tunnettava

1. tuuletusraon ilmavirtaukset,
2. ilman ja rakenteen lämpötilat ja
3. kosteuspitoisuudet

Nämä voidaan selvittää käsinlaskentamenetelmällä, jota tässä luvussa tarkastellaan. Tuuletusraon virtaukset sekä tuuletusraon ilman ja rakenteen lämpötilat voidaan myös selvittää TKK:n Talonrakennustekniikan laboratoriossa tähän tarkoitukseen kehitetyllä RAKO-ohjelmalla, joka perustuu putkivirtauksen ja lukujen 3.4.2. ja 3.4.3. kaavoihin.

3.4.2. ILMAVIRTAUKSET

Kuten edellä todettiin, voidaan ilmavirtaukset jakaa pakotettuihin ja luonnollisiin ilmavirtauksiin. Pakotetut ilmavirtaukset aiheutuvat yleensä tuulesta tai puhaltimesta. Tuulen aiheuttama paine-ero tuuletusraon sisään- ja ulosvirtausaukon välillä voidaan laskea kaavalla

$$\Delta p = (C_1 - C_2) \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.2.)$$

C_1 = muotokerroin sisäänvirtausaukon kohdalla

C_2 = muotokerroin ulosvirtausaukon kohdalla

ρ = ilman tiheys (kg/m^3)

v = tuulen nopeus (m/s)

Tuulen nopeutena käytetään luvussa 3.1. esitettyjä rakennusta ympäröivästä maastosta ja tarkastelukohdan korkeudesta riippuvia todellisia rakenteeseen kohdistuvia tuulen nopeuksia tai tarkasteltavasta ilmiöstä riippuen erilaisia tuulen nopeuden ääriarvoja.

Luonnolliset ilmavirtaukset aiheutuvat lämpötilaeroista johtuvista ilman tiheyseroista, joista syntyvä paine-ero on

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2) g h \quad (3.3.)$$

ρ_1 = tuuletusrakoon tulevan ilman tiheys (kg/m³)

ρ_2 = tuuletusraosta poistuvan ilman tiheys (kg/m³)

g = maan vetovoiman kiihtyvyys (= 9.81 m/s²)

h = tuuletusraon korkeus (m)

Ilman tiheys voidaan laskea kaavalla

$$\rho = 353 / T \quad (3.4.)$$

T = ilman absoluuttinen lämpötila (K)

Tuuletusraossa tapahtuva painehäviö voidaan laskea putkivirtauksen yleistä yhtälöä (3.6.) soveltamalla. Putkivirtauksen yhtälöissä putken halkaisija d korvataan poikkileikkauksen hydraulisella halkaisijalla d_h , joka määritellään poikkileikkausalan A ja märkäpiirin U avulla.

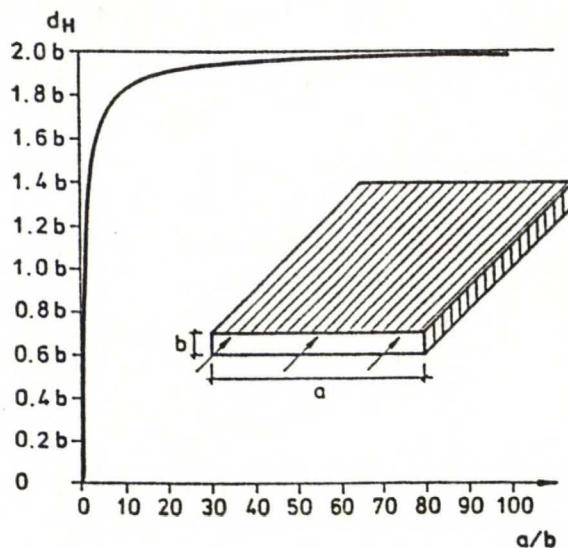
$$d_h = 4A / U \quad (3.5.)$$

Taulukossa 3.4. on esitetty muutamien poikkileikkausmuotojen hydrauliset halkaisijat, ja kuvassa 3.9. esitetään hydraulinen halkaisija raon sivujen suhteen funktiona.

Taulukko 3.4. Hydraulinen halkaisija erilaisille poikkileikkausmuodoille.

| Poikkileikkausmuoto | d_h |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Ympyrä (halkaisija d) | d |
| Suorakaide (sivut a ja b) | $\frac{2ab}{b/a + 1}$ |
| Yhdensuuntaiset tasot (väli b) | $2b$ |

$$\frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{2 \pi r} = 2r = d$$



Kuva 3.9. Suorakulmaisen raon hydraulinen halkaisija erilaisilla sivujen suhteilla a/b .

Nähdään, että esimerkiksi raon paksuudella 20 mm ja leveydellä 600 mm, joka on tyypillinen levyverhotuissa tuuletetuissa rakenteissa, sivujen suhde on 30, jolloin käytettäessä laskennassa yhdensuuntaisten tasojen hydraulista halkaisijaa $2b$ virhe on noin 4 %.

Putkivirtauksen yleisen yhtälön ensimmäinen summalauseke on kitkan aiheuttamaa ja toinen kertavastusten aiheuttamaa painehäviötä. Kertahäviöiden yhteydessä keskimääräinen virtausnopeus lasketaan supistuman tapauksessa supistuman jälkeisessä raonosassa sekä laajentuman ja mutkan tapauksessa edeltävässä putken osassa [7].

$$\Delta p = \sum \left[f \frac{l}{d_h} \frac{\rho v_m^2}{2} \right]_i + \sum \left[k \frac{\rho v_m^2}{2} \right]_j \quad (3.6.)$$

- Δp = painehäviö (Pa)
- f = kitkakerroin
- l = raon osan pituus (m)
- d_h = raon osan hydraulinen halkaisija (m)
- k = kertavastuskerroin
- ρ = virtaavan aineen tiheys (kg/m^3)
- v_m = virtaavan aineen keskimääräinen nopeus (m/s)

Kitkan aiheuttamat painehäviöt tapahtuvat koko raon pituudella. Kitkakertoimen suuruuteen vaikuttavat yleisessä tapauksessa Reynoldsin luku (Re) ja raon sisäpinnan karheus (e).

Reynoldsin luku määritellään kaavalla

$$Re = v d_h / \nu \quad (3.7.)$$

- v = virtausnopeus (m/s)
- d_h = hydraulinen halkaisija (m)
- ν = ilman kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)

Rakovirtaus tai putkivirtaus on laminaarista, kun Reynoldsin luku on pienempi kuin 2300 ja turbulenttista, kun Reynoldsin luku on suurempi kuin 3500. Laminaarisen ja turbulenttisen alueen väliin jää ns. siirtymäalue.

Kitkakertoimet voidaan laskea ympyräpoikkileikkauksiselle putkelle taulukon 3.5. mukaisesti.

Karheus e vaikuttaa kitkakertoimen arvoon turbulenttisella alueella sekä siirtymäalueella, ja sen arvoja on määritelty erilaisille pinnoille taulukossa 3.6.

Taulukko 3.5. Ympyräpoikkileikkauksisen putken kitkakerroin. Jos virtaus tapahtuu kahden yhdensuuntaisen tason välisessä tilassa, korvataan * : llä merkityt vakiot 64 vakiolla 96 /9/.

| Re | f |
|--|---|
| < 2300 | $\frac{64 *}{Re}$ |
| 2300-3500 | $\frac{(3500-Re) \frac{64 *}{2300} + (Re - 2300) f_t(Re = 3500)}{1200}$ |
| > 3500 | f_t |
| $f_t = \left[2 \lg \left[\frac{-4,793}{Re} \lg \left[\frac{10}{Re} + 0,2 \frac{e}{d} \right] + 0,2698 \frac{e}{d} \right] \right]^{-2}$ | |

Taulukko 3.6. Erilaisten pintojen karheuksia /2/ /11/.

| Materiaali | Ominaisuus | Karheus e (mm) |
|--|---|---------------------|
| Lasi, kupari, alumiini, muovi | uusi | 0 - 0.0015 |
| Teräslevy, vedetty hitsattu sinkitty | uusi | 0.01 - 0.05 |
| | | 0.05 - 0.10 |
| | | 0.12 - 0.15 |
| | vanha väh. ruost. vanha kovin ruost. | 0.15 - 0.4 2 - 4 |
| Puu | uusi | 0.2 - 1.0 |
| Betoni | uusi | 0.1 - 0.15 |
| | vanha keskikarkea | 1 - 2 |
| | vanha karkea | 2 - 3 |
| Tiilimuuraus | tasoitettu | 2 - 3 |
| | raaka | 5 - 8 |
| Pesubetoni | | 3 - 8 |

Kertahäviöt aiheutuvat virtaustien poikkileikkauksen muutoksista ja mutkista. Virtaustien supistumien ja laajentumien aiheuttamat virtauksen ja paineen periaatteelliset muutokset esitetään kuvassa 3.10.

Kertahäviökertoimen suuruuteen vaikuttavat muutoskohdan geometria ja virtauksen Reynoldsin luku. Lähteessä /9/ on esitetty kertavastuksille seuraavat laskentakaavat:

- supistuma $k_c = (1 - \sigma)^2 + K_c,$ (3.8.)
missä $\sigma = A_2/A_1$ (kts. kuva 3.10.)

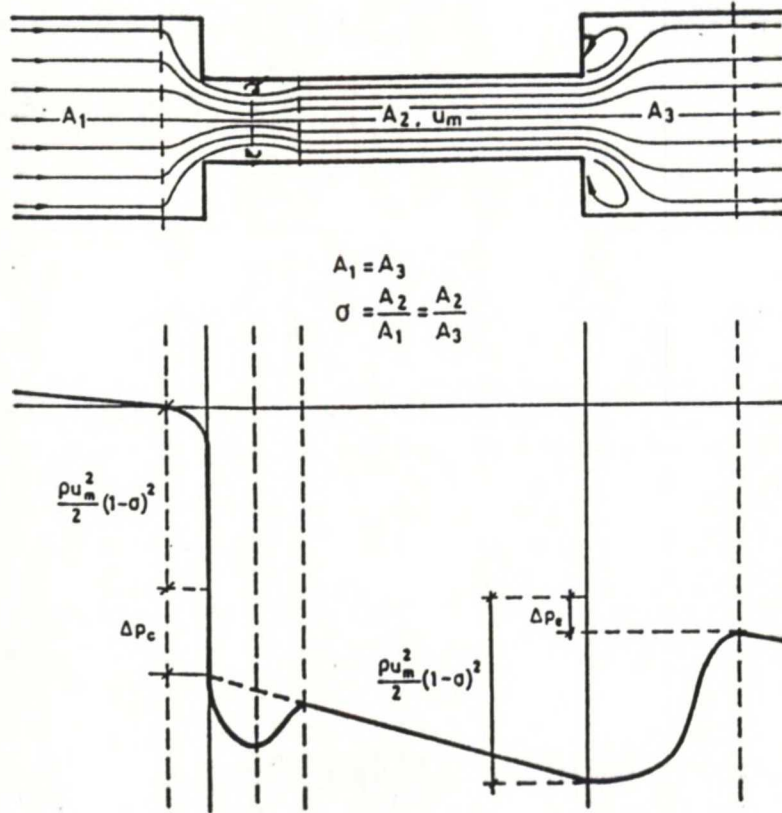
- laajentuma $k_e = -(1 - \sigma)^2 + K_e,$ (3.9.)
missä $\sigma = A_2/A_3$ (kts. kuva 3.10.)

- mutka 90°

$$k_b = 36 f, \text{ kun } 3000 < Re < 40\,000 \quad (3.10)$$

$$k_b = 1.2, \text{ kun } Re < 3000 \quad (3.11)$$

f on mutkaa edeltävän putken osan kitkakerroin



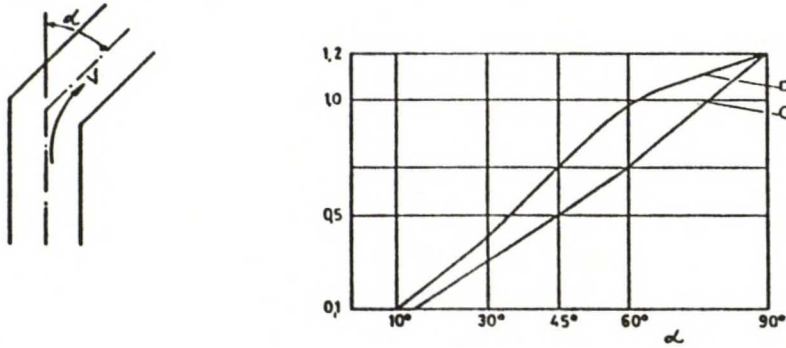
Kuva 3.10. Supistuma ja laajentuma suljetussa virtauksessa. Virtauksen ja paineen muutokset /9/.

K_c ja K_e riippuvat Reynoldsin luvusta ja pinta-alojen suhteesta, ja ne voidaan laskea taulukon 3.7. kaavojen avulla.

Taulukko 3.7. K_c :n ja K_e :n arvot Reynoldsin luvun eri arvoilla /9/.

| Re | K_c | K_e |
|--|----------------------------------|--|
| <1000 | $0,98 Re^{-0,03} + \Delta K_c$ | $-0,036 + 9,6 \cdot 10^{-5} Re + \Delta K_e$ |
| 1000 - 3000 | $10,59 Re^{-0,374} + \Delta K_c$ | $1,28 \cdot 10^{-5} Re^{1,223} + \Delta K_e$ |
| >3000 | $0,57 Re^{-0,01} + \Delta K_c$ | $0,21 Re^{0,012} + \Delta K_e$ |
| $\Delta K_c = -0,067 \sigma + 0,373 \sigma^2$ $\Delta K_e = 0,78 - 1,56 \sigma, \text{ kun } \sigma < 0,5$ $0,48 - 0,96 \sigma, \text{ kun } \sigma > 0,5$ | | |
| Jos $\sigma < 0,05$, niin $K_e = 1,00$ | | |

Kulman suuruuden vaikutus ympyrä- ja suorakulmapoikkileikkauksellisen putken mutkan kertavastuskertoimeen esitetään kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Mutkan kertavastuskerroin kulman funktiona /11/.

Virtaustien supistuman jälkeisen osan ollessa lyhyt ei virtaus ehdi tasoittua vaan kehittyy edelleen supistuman vaikutuksesta laajentuman jälkeen. Lyhyitä muutosalueita sisältävää virtaustietä tarkasteltaessa on kitka- ja kertahäviökertoimia tästä syystä korjattava. Lähteen /9/ mukaan korjauskertoimet lasketaan seuraavasti:

$$B_f = (Re d_h / l)^{1/3} \cdot \sigma^{1/4} \quad (3.12.)$$

Kun B_f on suurempi kuin 2,25 on häviökertoimia korjattava.

Kitka- ja kertahäviöiden korjauskertoimet ovat:

$$C_f = 0,122 \cdot B_f + 0,725 \quad (3.13.)$$

$$C_c = -0,304 \cdot B_f + 1,684 \quad (3.14.)$$

$$C_e = 0,792 \cdot B_f - 0,782 \quad (3.15.)$$

Kitka- ja kertahäviökertoimet ovat tällöin:

$$f^* = C_f \cdot f \quad (3.16.)$$

$$k_c^* = (1 - \sigma)^2 + C_c \cdot K_c \quad (3.17.)$$

$$k_e^* = -(1 - \sigma)^2 + C_e \cdot K_e \quad (3.18.)$$

Tuuletusraon eri osien virtausnopeuksien välinen riippuvuus saadaan massan säilymisen periaatteesta, jonka mukaan massavirta jokaisessa poikkileikkauksessa on yhtäsuuri. Saadaan jatkuvuusyhtälö

$$\rho Q = \rho A v = \text{vakio} \quad (3.19.)$$

ρ = ilman tiheys (kg/m³)

Q = tilavuusvirta (m³/s)

A = raon poikkileikkauksen pinta-ala (m²)

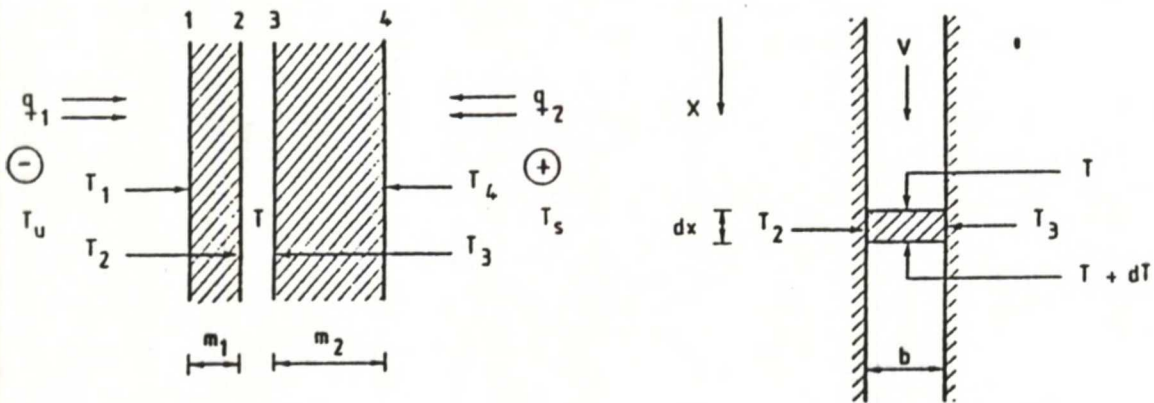
v = virtausnopeus (m/s)

Tuuletusraon virtauksien määrittämiseksi tuuletusraossa tapahtuva painehäviö (kaava 3.6.) merkitään yhtä suureksi kuin lämpötilaeroista aiheutuvan savupiippuvaikutuksen tai tuulen

paine-erojen aiheuttama tuuletusraon päiden välinen paine-ero (kaava 3.3. tai 3.2.). Ratkaisussa käytetään apuna jatkuvuusyhtälöä (3.19.). Ratkaisu joudutaan etsimään iteroimalla, koska painehäviöt riippuvat virtausnopeudesta. Yleensä iteroimalla ratkaistaan Reynoldsin luku, minkä jälkeen virtausnopeudet voidaan laskea Reynoldsin luvun määritelmän (3.7.) perusteella.

3.4.3. RAKENTEEN LÄMPÖTILOJEN MÄÄRITTÄMINEN JA K-ARVON LASKENTA

Tuuletusraollisen rakenteen lämmön siirtymisen laskennallinen arviointi voidaan tehdä lähteessä /47/ esitetyn menetelmän mukaisesti. Lämmön siirtyminen ratkaistaan rakenteen eri pinnoille ja ilmaraossa virtaavalle ilmalle kirjoitettujen lämpötaseyhtälöiden avulla. Lämpötaseyhtälöt eri pinnoille saadaan kirjoittamalla pintaan tuleva ja pinnasta lähtevä lämpövirran tiheys yhtäsuuriksi. Tuuletusraossa virtaavan ilman lämpötaseyhtälö saadaan merkitsemällä tilavuusalkioon tuleva ja siitä lähtevä lämpövirta yhtäsuuriksi. Pintojen ja tuuletusraon ilman lämpötaseyhtälöissä käytetyt merkinnät esitetään kuvassa 3.12.



Kuva 3.12. Pintojen numerointi ja lämpötaseyhtälöissä käytetyt merkinnät /47/.

Pintojen lämpötaseyhtälöt:

$$\text{Pinta 1} \quad 1/m_1 \cdot (T_2 - T_1) + q_1 = \alpha_1(T_1 - T_u) + \alpha_{s1}(T_1 - T_u) \quad (3.20.)$$

$$\text{Pinta 2} \quad \alpha_2(T - T_2) + \alpha_{s2}(T_3 - T_2) = 1/m_1 \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.21.)$$

$$\text{Pinta 3} \quad 1/m_2 \cdot (T_4 - T_3) = \alpha_3(T_3 - T) + \alpha_{s3}(T_3 - T_2) \quad (3.22.)$$

$$\text{Pinta 4} \quad \alpha_4(T_s - T_4) + \alpha_{s4}(T_s - T_4) + q_2 = 1/m_2 \cdot (T_4 - T_3) \quad (3.23.)$$

Ilman lämpötaseyhtälö:

$$c_p \rho v b T + \alpha_3(T_3 - T) dx = \alpha_2(T - T_2) + c_p \rho v b (T - dT) \quad (3.24.)$$

Lämpötaseyhtälöissä esiintyvät tuuletusraon pintojen ja virtaavan ilman lämpötilat voidaan ratkaista, kun muut termit oletetaan vakioiksi. Pintalämpötiloiksi saadaan

$$T_1 = (k_1 T_2 + (\alpha_1 + \alpha_{s1}) T_u + q_1) / D_1 \quad (3.25.)$$

$$T_2 = C_1 T + C_3 \quad (3.26.)$$

$$T_3 = C_2 T + C_4 \quad (3.27.)$$

$$T_4 = (k_2 T_3 + (\alpha_4 + \alpha_{s4}) T_s + q_2) / D_2 \quad (3.28.)$$

Tuuletusraon ilman lämpötila on tällöin

$$T(x) = \left[T_u - \frac{B_3}{B_2} \right] \exp \left[- \frac{B_2 x}{B_1} \right] + \frac{B_3}{B_2} \quad (3.29.)$$

Lämpötilojen kaavoissa esiintyvät vakiot saadaan liitteessä 1 esitetyistä lausekkeista. Pintojen ja ilman lämpötilojen arvot ovat paikallisia rakenteen läpäisemän lämpövirran tiheyden vaihdellessa eri kohdissa.

Säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimet voidaan laskea kaavoilla:

$$\alpha_s = (T_1^3 + T_1^2 T_{II} + T_1 T_{II}^2 + T_{II}^3) \sigma / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_{II} - 1) \quad (3.30.)$$

$$\alpha_k = 6 + 4v, \quad v < 5 \text{ m/s} \quad (3.31.)$$

$$\alpha_k = 7,41 v^{0,78}, \quad v > 5 \text{ m/s} \quad (3.32.)$$

$$\alpha_k = 2,0 (T_1 - T_{II})^{0,25} \quad (3.33.)$$

| | | |
|-------|----------------|--|
| missä | $T_1 =$ | säteilypinnan absoluuttinen lämpötila (K) |
| | $T_{II} =$ | vastasäteilypinnan absoluuttinen lämpötila (K) |
| | $\sigma =$ | Stefan Boltzmannin vakio ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) |
| | $\epsilon_i =$ | pinnan i emissiokerroin ($i = 1, 2$), useimmilla rakennusmateriaaleilla emissiokerroin on n. 0,9 |
| | $v =$ | virtausnopeus tai tuulen nopeus (m/s) |

Jos ilmavirtauksen nopeus on pieni, on yleensä parempi käyttää vapaan konvektion kaavaa. Lähteissä /7/ ja /46/ on esitetty tarkempia menetelmiä säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimien laskemiseksi.

Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan tuuletetun ilmaraon ja sen ulkopuolisen verhouksen lämmönvastuksen saa ottaa huomioon lämmönläpäisykerrointa laskettaessa vain, jos niiden vaikutus rakenteeseen on erikseen selvitetty. Tuuletusraon vaikutus lämmönläpäisykertoimeen voidaan selvittää mm. kokeellisesti, mutta paikallisesti sitä voidaan arvioida myös laskennallisesti. Rakenteen paikallinen lämmönläpäisykerroin, joka ottaa huomioon tuuletusraon ilman ja sen ulkopuolisen verhouksen lämmönvastuksen, voidaan laskea kaavalla 3.34.

/47/. Keskimääräinen lämmönläpäisykerroin voidaan laskea rakenteelle paikallisten arvojen esiintymispinta-aloilla painotettuna keskiarvona.

$$k = q_s / (T_s - T_u) = k_2 (T_4 - T_3) / (T_s - T_u) \quad (3.34.)$$

3.4.4. RAKENTEEN KOSTEUDENPOISTOKYVYN MÄÄRITTÄMINEN

Tuuletusrakoon diffuusiolla sisältä tuleva kosteus voidaan laskea kaavalla 3.35. Tuuletusraon kosteuspitoisuuden voidaan arvioinnissa olettaa olevan saman kuin ulkoilman.

$$g = \frac{\Delta p}{r_k} \quad (3.35.)$$

g = diffuusiolla kulkeva kosteuden määrä ($\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$)

Δp = vesihöyryn osapaineiden ero rakenteen yli (N / m^2)

r_k = rakenteen kokonaisdiffuusiovastus (Ns / kg)

Ilmavirtauksen mukana siirtyvä kosteusmäärä huokoisten aineiden läpi voidaan arvioida yhtälöstä

$$g = -k_a c \frac{dp}{dx} \quad (3.36.)$$

g = kosteusvirta aika- ja pintayksikössä ($\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$)

k_a = aineen ilman läpäisevyys ($\text{m}^3\text{s} / \text{kg}$)

c = ilman vesihöyrymäärä (kg / m^3)

p = ilmanpaine (Pa)

x = virtausmatka (m)

Rakojen ja reikien kautta kulkevaa ilma- ja kosteusmäärää on vaikea määrittellä paine-erojen perusteella. Mutta jos tiedetään ilmamäärä, voidaan kosteusvirta laskea kaavasta

$$g = a \cdot Q \quad (3.37.)$$

g = kosteusvirta aikayksikössä (kg / s)

a = ilmavirran kosteuspitoisuus (kg / m^3)

Q = raon tai reiän kautta kulkeva ilmavirta (m^3 / s)

Sisältä tulevaa kosteutta laskettaessa sisäilman kosteus voidaan arvioida ulkoilman kosteudesta sisäilman kosteuslisän avulla. Kosteuslisän arvoiksi ilmoitetaan yleensä /32/:

2 g/m^3 toimistorakennuksissa

3 g/m^3 tavallisissa asuinrakennuksissa

4 g/m^3 kosteissa huonon ilmanvaihdon omaavissa rakennuksissa.

Sisäilman kosteus voidaan myös laskea tarkemmin kaavalla

$$a_s = a_u + \frac{G}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad (3.38.)$$

a_s = sisäilman kosteus (kg/m^3)
 a_u = ulkoilman kosteus (kg/m^3)
 G = kosteuden tuotto (kg/h)
 n = ilmanvaihtoluku ($1/\text{h}$)
 V = tarkasteltavan tilan tilavuus (m^3)
 t = aika (h)

Tarkasteltaessa pidempää ajanjaksoa e^{-nt} lähestyy arvoa nolla, jolloin kaava yksinkertaistuu muotoon

$$a_s = a_u + \frac{G}{nV} \quad (3.39.)$$

Tuuletusraon poistama kosteusmäärä voidaan määrittää kaavalla 3.40., kun tiedetään tuuletusraon tilavuusvirta ja tuuletusrakoon tulevan ja sieltä poistuvan ilman kosteuspitoisuus.

$$G = Q(a_{\text{ulos}} - a_{\text{sisään}}) \quad (3.40.)$$

G = kosteusmäärä (kg / s)
 Q = tilavuusvirta = $A \cdot v$ (m^3 / s)
 a = ilman kosteuspitoisuus (kg / m^3)

Tuuletusraon poistaman kosteuden määrä seinäpinta-alaa kohden voidaan laskea kaavalla

$$g = \frac{bv}{l} (a_{\text{ulos}} - a_{\text{sisään}}) \quad (3.41.)$$

g = kosteusmäärä ($\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$)
 b = tuuletusraon leveys (m)
 v = virtausnopeus (m / s)
 l = tuuletusraon korkeus (m)

Tuuletusraon maksimaalinen kosteudenpoistokyky voidaan arvioida kaavojen 3.40. ja 3.41. avulla, kun tuuletusraosta poistuvan ilman kosteuspitoisuudeksi oletetaan ulkoilman lämpötilaa vastaavan kyllästystilan ilman vesihöyrymäärä ja tuuletusrakoon tulevan ilman kosteuspitoisuudeksi ulkoilman vesihöyrymäärä. Tarkastelu voidaan tehdä esimerkiksi kuukausittain kuukausien keskimääraisten lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien avulla. Tuuletusrakoon taustarakenteen läpi tulevaa kosteusmäärää voidaan verrata tuuletusraon kosteudenpoistokykyyn, jolloin esim. vuositaselaskelman avulla voidaan tarkastella tuuletusraosta kuukausittain poistuvan tai tiivistyvän kosteuden määriä. Lisäksi on syytä tehdä tarkasteluja myös ääriolosuhteissa.

Edellä esitetty yksinkertaistettu kosteudenpoistokyvyn tarkastelu ei ota huomioon ilman lämpenemistä tuuletusraossa. Tuuletusraon ilman lämmitessä sen kyky sitoa itseensä kosteutta kasvaa. Kuitenkin julkisivuverhouksen lämpötila alimmillaan noudattelee ulkoilman lämpötilaa ja tuuletusraon ilman ollessa lämpimämpää ja sen sisältämän kosteuden ollessa lähes 100 %

tapahtuu tiivistymistä tuuletusraon pinnoille. Tämän vuoksi kosteudenpoistokyvyn laskennassa ei tulisi ottaa huomioon ilman lämpenemistä tuuletusraossa.

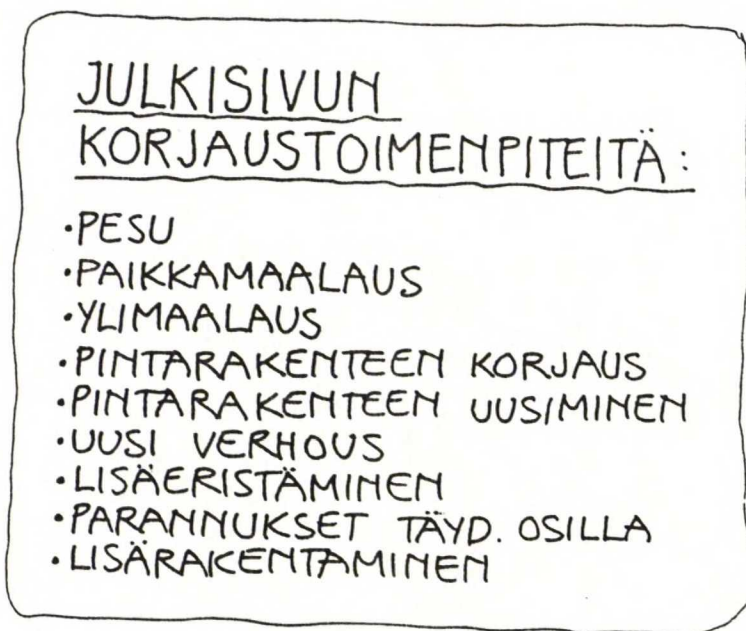
Tiivistyneen kosteuden määriä tarkasteltaessa voidaan sen sijaan ottaa huomioon ilman lämpeneminen tuuletusraossa, sillä ilman lämmitessä sen kosteuspitoisuus voi nousta yli verhouspinnan lämpötilaa vastaavan kyllästyspitoisuuden, jolloin kosteus tiivistyy verhouksen pintaan.

Sisältä rakenteen läpi kulkeutuva kosteus voi tiivistyä myös rakenteen sisälle, ja tämän vuoksi varsinaisen taustarakenteen kosteustekninen toiminta tulee varmistaa ennen tuuletusraon toimivuuden tarkasteluja.

4. KEVYTRAKENTEISIA JULKISIVUNKORJAUSMENETELMIÄ

4.1. YLEISTÄ

Julkisivunkorjausmenetelmiä on hyvin paljon erilaisia ja eri tarkoitukseen soveltuvia. Julkisivun korjaukseksi ymmärretään kaikki kevyestä laastipaikkauksesta koko julkisivun uusimiseen (kuva 4.1). Tässä luvussa käydään läpi rakenteellisia, usein lisälämmöneristeen kanssa yhdessä käytettäviä korjausmenetelmiä, joissa vanhan julkisivun päälle rakennetaan uusi julkisivurakenne ja julkisivupinta. Menetelmät voidaan siinä mielessä ajatella kevytrakenteisiksi korjausmenetelmiksi, ettei uusi julkisivurakenne yleensä tarvitse omaa perustusta tai konsolia, vaan se kiinnitetään vanhaan seinärakenteeseen. Vanhan julkisivurakenteen pintaa ei myöskään tavallisesti pureta.



Kuva 4.1. Julkisivun eriaisteiset korjaustavat /8/.

1900-luvun alkupuoliskon rapattujen rakennusten julkisivu on usein niin monimuotoinen, että sen korjaaminen tässä luvussa esitetyillä menetelmillä on usein vaikeaa ja kallista. Ikkunatotomat, suoraviivaiset päädyt voidaan kuitenkin näillä menetelmillä lisäeristää, jos halutaan tasoitaa rakennuksen lämpötilaa.

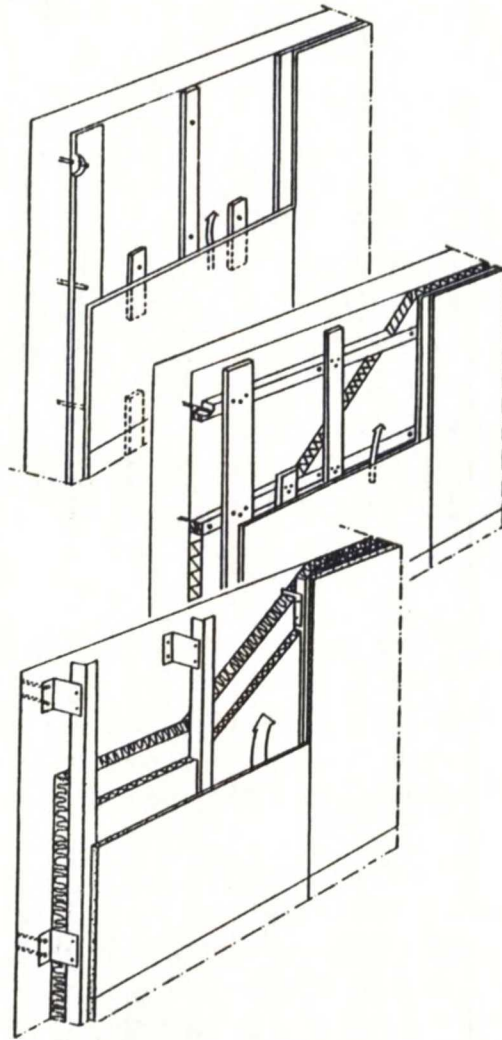
1940-luvulta lähtien rakennettujen talojen arkkitehtuuri on suoraviivaista, joten kevytrakenteiset julkisivukorjaukset voidaan tehdä kohtuullisin kustannuksin. 1960-luvulle asti rakennetut talot ovat usein kylmiä, jolloin korjauksen yhteydessä tehdyllä lisäeristämällä voidaan parantaa tilannetta. Kevytbetonirunkoisia ja sandwich-elementtirunkoisia taloja lisäeristetään jo paljon.

Kevytrakenteiset julkisivunkorjausmenetelmät ovat hankintakustannuksiltaan verrattain kalliita toimenpiteitä. Niiden taloutta tulee verrata pikällä tähtäimellä muihin, yleensä halvempiin, mutta useammin toistuviin korjaustoimenpiteisiin. Lämmönsäastöt parantavat osaltaan lisäeristetyn korjauksen taloutta, vaikka säästöt eivät yleensä riitä koko investoinnin takaisinmaksuun.

4.2. JULKISIVULEVYILLÄ TEHTÄVÄ KORJAUS

4.2.1. MENETELMÄN KUVAUS

Julkisivukorjaus julkisivulevyillä muodostaa tuuletusraollisen rakenteen, jossa verhouslevyt kiinnitetään puu- tai metallirankaan. Pystykoolauksen väli on useimmiten 600 mm. Koolausten väliin kiinnitetään pystysuoria tukikapuloita levyjen ylä- ja alareunoihin. Kapuloiden väli riippuu verhouslevyn materiaalista. Koolaus mitoitetaan joko riittävän korkeaksi tai tehdään ristikoolauksena siten, että ulkoverhouksen ja lisälämmöneristeen väliin jää aina kunnollinen tuuletusrako. Lisälämmöneristeenä käytetään useimmiten pehmeätä mineraalivillaa suojattuna joko tuulensuojalevyllä tai kovalla lämmöneristeellä. Esimerkkejä julkisivulevykorjauksen rakenteesta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Julkisivulevykorjauksen rakennevaihtoehtoja /16/.

Julkisivulevyillä tehtävässä korjauksessa julkisivulevyinä voidaan käyttää kivipintaisia, pinnoitettuja tai pinnoittamattomia levyjä. Valmistusmateriaalina voi olla kalsiumsilikaatti (esim. Masterstone, Chromaclad, Masterclad), kuitusementti (esim. Cemstone, Cemcolour, Glasal, Luja-julkisivulevyt), vaneri (esim. Karaattilevy) tai polymeeri-betoni (esim. Steni / Stenix-Parma).

Tuotteesta riippuen on saatavana erilaisia nurkka- ja saumaosia. Saumat voidaan tehdä umpinaisina esim. kittaamalla elastisella saumausmassalla tai avonaisina käyttämällä vaakasaumoissa muovipinnoitetusta pellistä taivutettua tippalistaa ja pystysaumoissa kumista taustanauhaa tai muovipinnoitettua peltikaistaa.

4.2.2. MENETELMÄN ANALYSOINTI

Erilaisia verhoukslevyjä käytettäessä kriittisiä kohtia ovat verhouksen ja siinä olevien kiinnityskohtien ja saumojen sateenpitävyys. Hyvässä levytysratkaisussa on yksityiskohtiin suunniteltuja valmiita toteutusratkaisuja sekä sauma- ja liityntäkappaleita. Kiinnityskohdat tulee olla vesieristettyjä. Umpisaumoja käytettäessä huomio kiinnittyy saumausmateriaalin pitkäaikaiskestävyyteen ja uusittavuuteen. Jos rakenteeseen pääsee vettä huonosti suunniteltujen detaljien kautta, eikä kunnollista vedenpoistoa ole järjestetty, voivat puuosat lahota. Kosteutta voi kertyä rakenteeseen myös, jos tuuletusrako on virtausteknisesti liian ahdas. Lahoriskin vuoksi käytetään koolauksissa usein painekyllästettyä puutavaraa. Metalliosien korroosiosta lisäeristysrakenteissa ei ole tähän mennessä saatu hälyttäviä tietoja.

Julkisivuverhouksen likaantuminen on paljolti riippuvainen ympäristöstä eli siitä, kuinka likaantuvassa paikassa kohde sijaitsee. Ohuissa levyverhouksissa likaantuminen ilmenee sauma- ja koolauskohtien tummumisena. Julkisivulevyjä voidaan pestä painepesurilla.

Levyverhouksissa on havaittu huomattavasti vähemmän mekaanisia vaurioita kuin esimerkiksi rappausmenetelmissä. Vaurioherkkyys riippuu levymateriaalin iskunkestävyydestä sekä pintamateriaalin ominaisuuksista.

Ulkonäöllisesti levypinnat sopivat parhaiten vuoden 1960 jälkeen rakennettujen betonielementtitalojen korjausmateriaaliksi sekä mineriittijulkisivuihin. Sen sijaan rappauspintojen muuttaminen levyverhotuksi ei aina johda ulkonäön kannalta parhaaseen lopputulokseen.

Menetelmää kalsiumsilikaattilevyn osalta on lähemmin tarkasteltu luvuissa 5, 7, 8 ja 9.

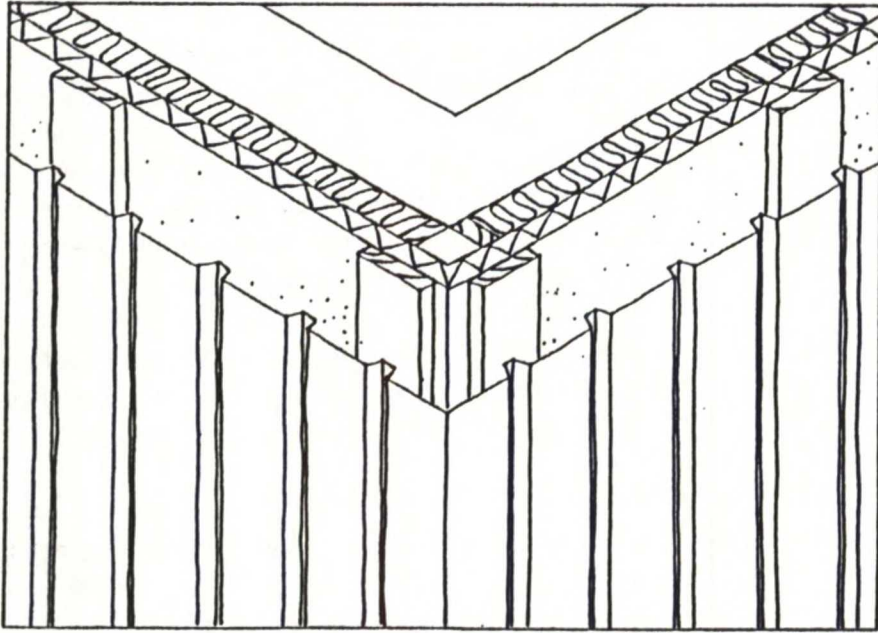
4.3. METALLILEVYILLÄ TAI -KASETEILLA TEHTÄVÄ KORJAUS

4.3.1. MENETELMÄN KUVAUS

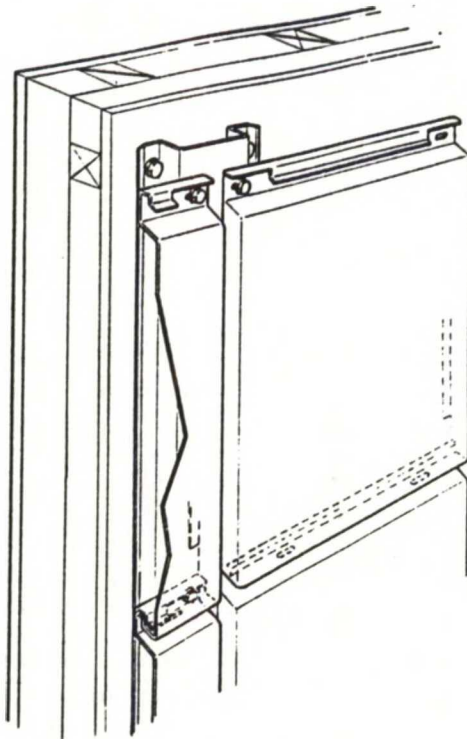
Julkisivukorjauksissa käytetyt metallilevyt ovat yleensä profiloituja, kuumasinkittyjä ja muovipinnoitettuja teräsohutlevyjä. Pinnoitteena on polyvinyylideenifluoridi (PVF2) tai PVC-plastisoli. Käytettyjen profiililevyjen paksuus vaihtelee 0,5-1,0 mm välillä, ja niiden paino vaihtelee 4,3 - 11 kg/m².

Metallikasetit valmistetaan usein muovipinnoitetusta teräsohutlevystä. Teräskasetin ainepaksuus on aiemmin ollut yleensä 0,7 mm ja paino 7-8 kg/m² kasetin koosta riippumatta. Nykyään teräskasettien minimiainevahvuus on 1,0 mm, ja paksuus kasvaa kasettikoon suuren tuessa aina 2,5 mm asti. Kasetit voidaan pinnoittaa erilaisilla orgaanisilla pinnoitteilla tai esim. klinkkerilaatoilla. Kasetit voidaan valmistaa myös esim. alumiinista tai kuparista.

Rakenne toimii levyverhouksen tapaan siten, että verhouksen taakse muodostuu tuuletusrako. Levyt ja kasetit kiinnitetään joko metalli- tai puurunkoiseen koolaukseen haponkestävillä tai ruostumattomilla ruuveilla tai piiloniiteillä. Lisälämmöneriste (mineraalivilla) asennetaan koolauksen väliin käyttäen tarvittaessa villakiinnikkeitä. Kolhiintumiselle alttiisiin kohtiin voidaan asentaa tavallista paksumpi levy tai kaksinkertainen levytys. Teräslevyn taakse liimattua filmivaneria on myös käytetty parantamaan pinnan iskunkestävyyttä. Nurkka- ja pielilistat sekä vesipellit tehdään yleensä työmaalla sileästä teräsohutlevystä. Profiilipellillä toteutettu julkisivurakenne on esitetty kuvassa 4.3. ja esimerkki metallikasettirakenteesta kuvassa 4.4.



Kuva 4.3. Julkisivukorjaus profiilipellillä /8/.



Kuva 4.4. Julkisivukorjaus metallikaseteilla /12/.

Suomessa profiilipeltiverhouksen raaka-aineena on yleensä Rautaruukki Oy:n valmistama muovipinnoitettu teräsohutlevy. Esimerkkinä teräskasettisysteemeistä on Liberta-järjestelmä.

4.3.2. MENETELMÄN ANALYSOINTI

Rakenteen fysikaalinen toiminta noudattaa tuuletusraollisen rakenteen toimintaa, jota on tarkasteltu luvussa 3. Metallikasettirakenteen osalta huomiota tulee kiinnittää tuuletusraon riittävään väljyyteen varsinkin kasettien reunoissa. Kasettisaumojen muotoilun toimivuutta tarkastellaan myös rakenteen vedenpitävyysominaisuuksien kannalta. Menetelmä asettaa melko suuret vaatimukset suunnitelmien mittatarkkuudelle, varsinkin jos käytettyjen kasettien asennustoleranssit saumojen muotoilun vuoksi ovat pieniä.

Aiemmin ohuempia ainepaksuuksia käytettäessä metallikasettiverhouksissa esiintyi kasettien pinnan käyrityksiä. Nykyään käytetyt ainepaksuudet ovat suurempia. Kun vielä varmistetaan, että käytetty teräslevy on oikaistua, ei vastaavia ongelmia uusissa kohteissa enää pitäisi syntyä.

Profiilipellillä korjatuissa kohteissa on ilmennyt julkisivun likaantumista lähinnä likavalumina ja tummumisena. Uusissa pinnoissa värit ovat suhteellisen tasalaatuiset. Metallipintoja voidaan pestä pinnalle soveltuvalla pesuaineella, esimerkiksi muovipinnoitettu tai maalattu teräsohutlevy voidaan puhdistaa alkalisilla pesuaineilla. Alumiini- ja muovipinnoitettu teräspinta voidaan myös tarvittaessa maalata.

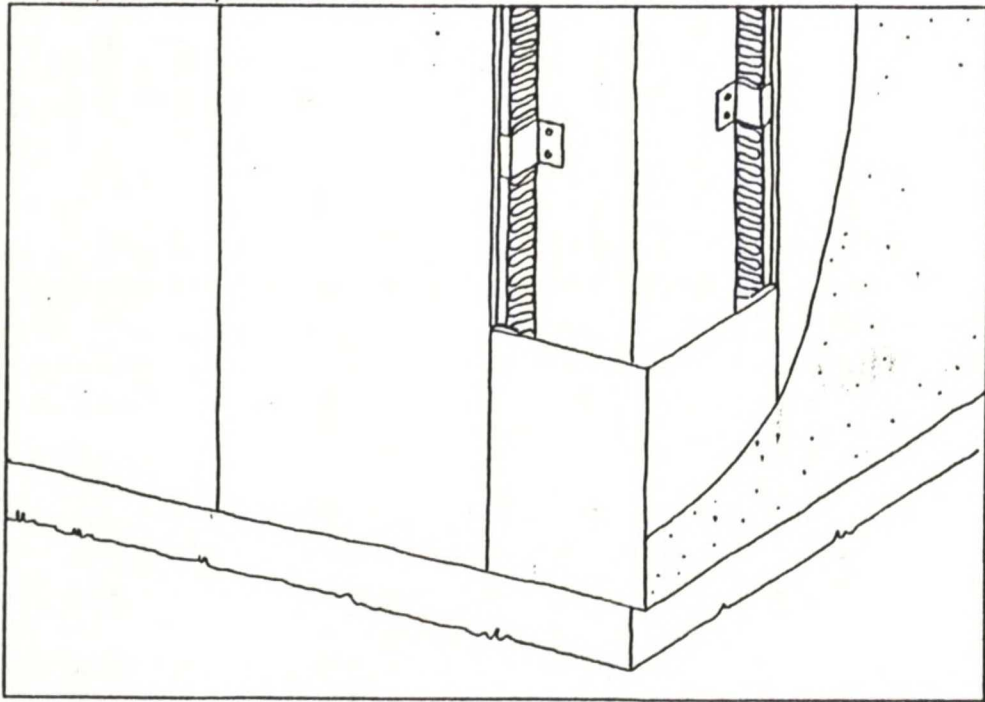
Julkisivun alaosissa on teräsohutlevykorjauksissa todettu mekaanisista iskuista aiheutuneita kolhuja. Näiden korjaaminen voi olla vaikeaa. Levyjen ja kasettien vaihtaminen uusiin käy yleensä helposti, mutta värierot vanhojen ja uusien levyjen välillä ovat todennäköisiä.

Profiilipeltiverhous tehdään yleensä tietyn vakioprofiilin omaavista levyistä. Usein koko talo tehdään profilointia muuttamatta joko vaaka- tai pystyprofilointia noudattaen. Profiilipelti näyttää vanhoissa kerrostaloissa oudolta ratkaisulta, koska vastaavaa verhousta ei ole aikaisemmin käytetty. Teräskasetit sen sijaan antavat siistin ja täsmällisen levyverhouksen vaikutelman, joka sopii hyvin tiettyyn osaan asuinkerrostalokannasta.

4.4. JULKISIVUKORJAUS SAUMATTOMAKSI PINNAKSI RAPATTAVILLA LEVYILLÄ TAI KASETEILLA

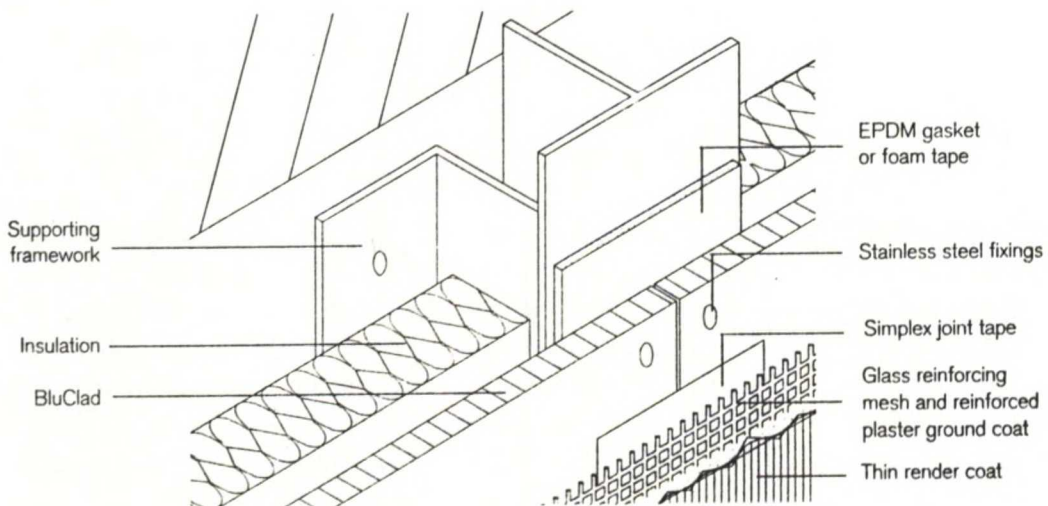
4.4.1. MENETELMÄN KUVAUS

Rapattu metallikasettijärjestelmä Suomessa on RR-julkisivujärjestelmä. Rakenne muodostuu 0,9 mm kuumasinkityistä pohjakäsitellyistä teräskaseteista ja kuumasinkityistä teräksisistä kiinnitysosista. Kiinnitys alustaan tapahtuu pistekiinnityksenä. Pinnoituksena käytetään ohut-rappausta, jonka sideaineena on synteettinen hartsi. Ennen pinnoitusta kasettien saumat kitataan. Kasettien taakse jää tuuletusrako. Menetelmää käytetään lisälämmöneristeen kanssa ja ilman. Kuvassa 4.5. on lisäeristetty RR-julkisivurakenne.



Kuva 4.5. Rapattu metallikasettijärjestelmä /8/.

Englannissa on kehitetty menetelmä, jossa saumaton rappauspinta saadaan aikaan pinnoittamalla kalsiumsilikaattilevy orgaanisella tai epäorgaanisella rappauksella. Pohjarakenne on samanlainen kuin tavallisessa levyrakenteessa. Molemmiin puolin mikrosilikoniemulsiolla käsitellyt levyt kiinnitetään puihin, teräksisiin tai alumiinisiin pystyrimoihin ruuveilla. Rimojen päällä on EPDM-lista. Saumoissa käytetään Tyvec-teippiä sekä lasikuituverkkoa. Pohjarappauksena käytetään orgaanista tai epäorgaanista rappautta, joka on elastinen ja erityisesti tarkoitettu sitomaan rappausalustassa olevia halkeamia. Pintarappaus valitaan pohjarappaukseen sopivaksi. Kuvassa 4.6. on rapatun levykorjauksen englantilaisen asennusohjeen mukainen rakenneleikkaus metallisia kiinnitysrimoja käyttäen.



Kuva 4.6. Rapattu kalsiumsilikaattilevymenetelmä /3/.

Menetelmä on aivan uusi ja ensimmäinen koekohde on vasta alkamassa Saksassa. Menetelmää on testattu laboratorio- ja kenttäolosuhteissa Englannissa, Saksassa ja pohjoismaissa.

4.4.2. MENETELMÄN ANALYSOINTI

Saumattomaksi rapattavan rakenteen suurin ongelmakohta on aluslevyn tai -kasetin saumoissa. Alustan liikkua lämmön ja kosteuden vaikutuksesta rappauksen muodonmuutokset keskittyvät sauman alueelle. Tämä edellyttää rappauskerrokselta suurta muodonmuutoskykyä myös alhaisissa lämpötiloissa. Vaadittu muodonmuutoskyky riippuu alustalevyjen tai -kasettien pituuden lämpötilakertoimista ja kosteuden vaihtelusta aiheutuvasta muodonmuutoksesta sekä levykoosta.

Orgaanisilla ohutpinnoitteilla käsitellyissä teräskaseteissa on käytännön kohteissa havaittu runsaasti ongelmia nimenomaan julkisivun pinnan ulkonäössä. Tyypillinen vaurio on pinnoitteen halkeilu kasettien saumakohdissa, mikä yleensä ilmenee hiushalkeamina n. 3-4 vuoden kuluessa työn valmistumisesta. Sen lisäksi pinta tummuu varsinkin sauma- ja koolauskohdista. Orgaaniset pigmentit myös haalistuvat helposti varsinkin tummina sävyinä. Seinien alaosissa mekaaniset iskut aiheuttavat vaikeasti korjattavia vaurioita.

Rapatusta kalsiumsilikaattilevymenetelmästä ei ole kohdetietoa olemassa. Kehitystyössä on kuitenkin tiedostettu menetelmän ongelmat ja yritetty löytää niille ratkaisua. Teräskasetteihin verrattuna kalsiumsilikaattilevyjen muodonmuutokset ovat pieniä, mutta levykoko on suurempi. Lämpörappaukseen verrattuna rapattava levy on mekaanisesti kestävämpi. Menetelmää on käsitelty lähemmin luvuissa 6, 7, 8 ja 9.

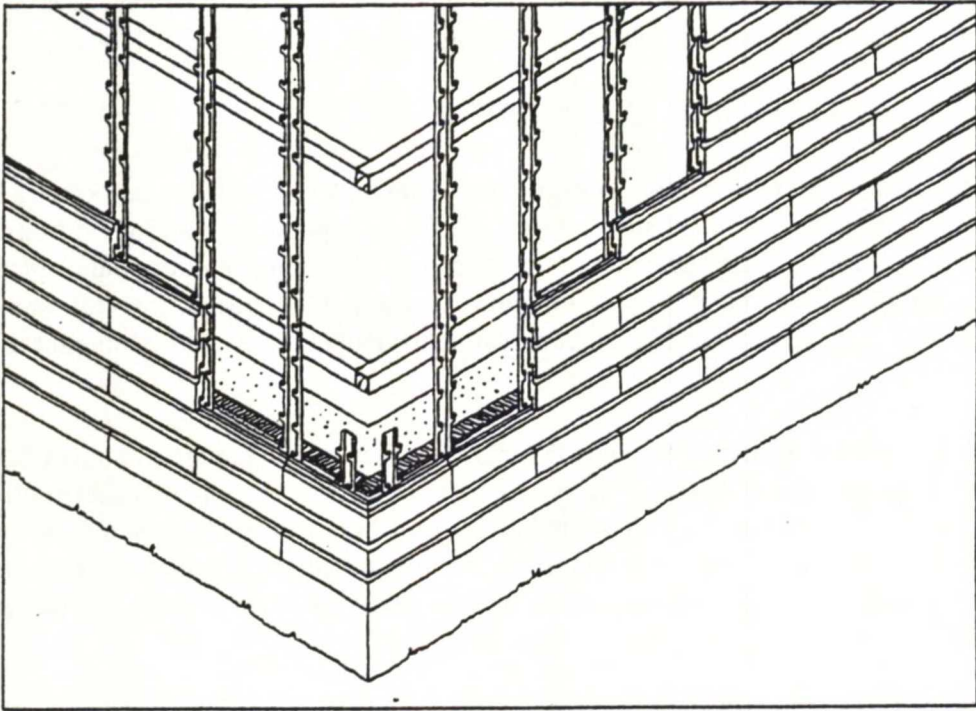
4.5. ELEMENTTIRAKENTEISET JULKISIVUNKORJAUSMENETELMÄT

4.5.1. MENETELMÄN KUVAUS

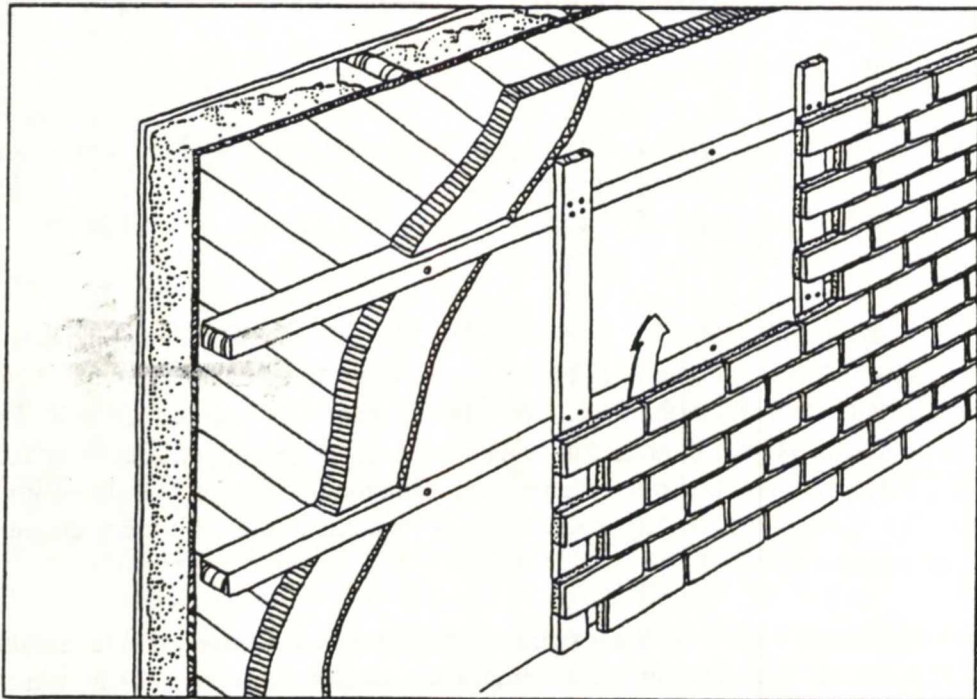
Julkisivukorjauksessa käytetyt elementit voivat olla pienenä elementtejä tai betonisia ohutkuorielementtejä. Ohutkuorielementit voivat olla mm. tiili-, klinkkeri-, rouhe- tai betonipintaisia. Esimerkkinä pienenä elementeistä on Coloroc, jossa käytetään läpivärjättyjä betonikiviä. Betoninen ohutkuorielementtimenetelmä on esim. Rati.

Coloroc-pienenä elementtijärjestelmä käsittää alumiiniset pystysuuntaiset kannatinkiskot, joiden koukkuihin betonimassasta kuivapuristamalla tehdyt kivet ripustetaan. Ylemmän rivin kivet puristavat alemmat tiiviisti listoihinsa. Kivien taakse kannatinkiskoja kohdalle jää 15 mm tuuletusrako. Asennuskiskot kiinnitetään seinään nauloin tai ruuvein tai lisäeristettäessä vaakaruoteisiin, joiden väliin lämmöneriste asennetaan. Lämmöneriste peitetään tuulensuojalevyllä tai -paperilla. Sisä- ja ulkonurkissa käytetään erillisiä nurkkakiviä. Coloroc-menetelmän rakenneratkaisu on esitetty kuvassa 4.7.

Rati-elementtiverhous kiinnitetään puu- tai metallirankaan ja rakenteen taakse jää tuuletusrako. Lämmöneristeenä käytetään pehmeätä mineraalivillaa suojattuna tuulensuojalevyllä tai jäykällä tuulensuojaeristeellä. Elementit ovat sormireunaisia ja ne asennetaan lomittain. Pinta jälkisaumataan yhtenäisen tiiliverhouksen näköiseksi. Verhoilussa käytetään erillistä nurkkapalaa. Rati-elementillä tehty korjausrakenne näkyy kuvassa 4.8.



Kuva 4.7. Coloroc-verhousjärjestelmän rakenne /8/.



Kuva 4.8. Rati-elementtiverhouksen rakenne /8/.

4.5.2. MENETELMÄN ANALYSOINTI

Elementtirakenteisissa julkisivunkorjausmenetelmissä rakenne toimii tuuletusraollisena. Kriittisiä kohtia ovat saumat, kulmat, ikkunoiden ja ovien pielet sekä sokkeli. Betonisissa verhouselementeissä kriittinen tekijä on myös laattojen pakkasenkestävyys. Rati-elementissä oleva jälkisaumattava saumarakenne muodostaa toimivan kokonaisuuden, samoin molemmissa menetelmissä erilliset kulmakappaleet saavat materiaalin jatkumaan kulman yli.

Coloroc-verhousta on useimmiten käytetty pientaloissa, koska se on helppo asentaa oma-toimisesti, mutta myös kerrostaloja on verhoiltu tällä menetelmällä. Verhouksen esteettinen soveltuvuus tiettyyn talotyyppiin riippuu rakennuksen hahmosta sekä julkisivun ja ikkunaukkojen suhteista. Pinta muistuttaa tiilimuurausta tai keilaponttilaudoitusta.

Coloroc-rakenne kestää vaurioitumatta alusrakenteen elämisen. Kivien värin pysyvyys on hyvä, koska betonikivet ovat läpivärjättyjä. Kivi on hauras eikä kestä hyvin kolhaisuja. Rikkoutuneen kiven voi kuitenkin vaihtaa helposti vaikka keskeltä seinää. Toisaalta irtonaisista osista ladottu seinä on altis ilkvallalle, jos verhoukset ulottuu katutasolle.

Rati-elementti sopii hyvin kohteeseen, jossa tavoitellaan tiilijulkisivun ulkonäköä, mutta ei haluta tai voida tehdä tiiliverhouksen vaatimia lisäperustuksia. Rati-elementillä toteutettu rakenne on myös ohuempi kuin oikea tiiliverhoukset, eikä niinollen vaikuta yhtä paljon rakennuksen linjoihin. Rati-elementillä ei kuitenkaan voida saavuttaa tiiliverhouksen mekaanista kestävyttä.

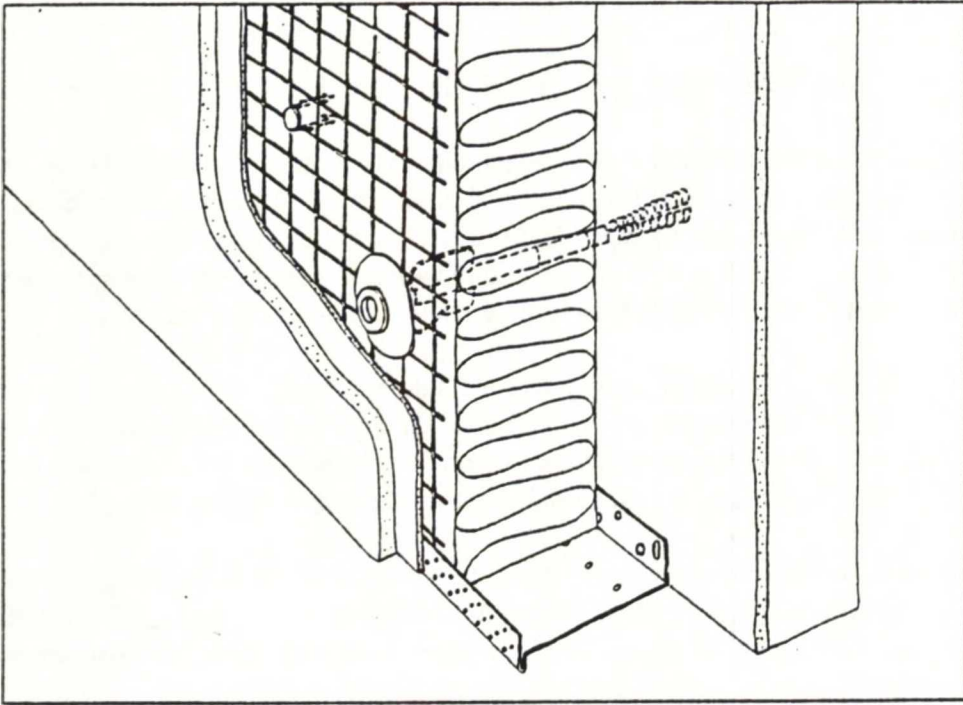
4.6. LÄMPÖRAPPAUS

4.6.1. MENETELMÄN KUVAUS

Lämpörappauksessa voidaan käyttää kahta rakenteeltaan erilaista menetelmää, joista toisessa lisäeristykseenä käytetään mineraalivillaa ja toisessa yleensä solumuovia. Edellisessä menetelmässä käytetään yleensä epäorgaanisia materiaaleja ja jälkimmäisessä orgaanisia. Rappaus on suoraan kiinni eristeessä.

Mineraalivillaeeristeinen lämpörappaus koostuu yleensä neljästä peruskomponentista: lisäeristeestä, rappauksesta, rappauksen lujitteesta ja kiinnikkeistä. Käytettävän mineraalivillan tiheys on menetelmästä riippuen 65-120 kg/m³. Kiinnikkeet ovat joustavia, jopa nivelellisiä metalli- tai muovikiinnikkeitä. Rappaus on yleensä epäorgaaninen kalkkisementtilaasteista tehty kolmikerrosrappaus. Rappauksen lujitteena käytetään yleisimmin sinkittyä, jäykkää teräsverkkoa. Mineraalivillarappauksen rakenne näkyy kuvassa 4.9.

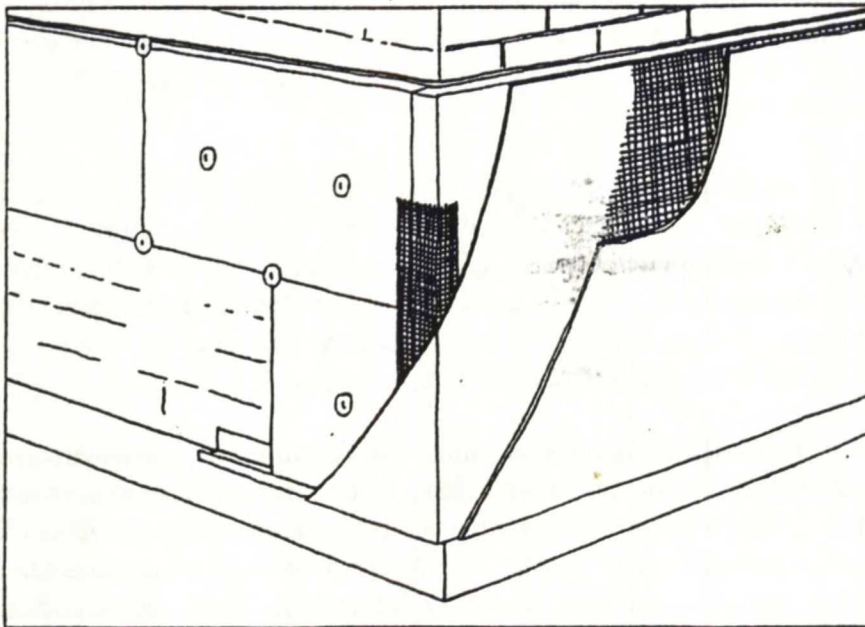
Rakenteen toiminta perustuu rappauksen vapaaseen liikkumiseen, ts. rappauksen tulee saada liikkua vapaasti suhteessa vanhaan rakenteeseen. Rappauskerros kannatetaan joustavien kiinnikkeiden ja lämmöneristeen yhteistoiminnan avulla. Rappauskentät jaetaan liikunta-saumoilla sopivan kokoiisiin osiin. Lisäksi uuden rappauksen ja vanhan rakenteen yhtymäkohtiin, kuten sokkelin, räystään, ikkuna- ja ovipielien sekä kiinnikkeiden kohdalle tehdään liikuntasauumat. Ikkuna- ja ovipielidetallit voidaan tehdä joko ohutpinnoitettavalla pellillä tai rappamalla.



Kuva 4.9. Mineraalivillaeristeinen lämpörappaus /8/.

Rappaus-mineraalivilla -menetelmiä ovat esimerkiksi Parmiterm, Rappaus-Karhu ja Serporock.

Orgaanisista materiaaleista koostuvissa rappausmenetelmissä lämmöneristeinä on yleensä polystyreenisolumuovi, joskus myös polyuretaanisolumuovi. Lämmöneriste kiinnitetään orgaanisilla tai epäorgaanisilla liimauslaasteilla. Lisänä voidaan käyttää pistekiinnitystä muovisilla sienikiinnikkeillä. Rappauksena on kuitu- tai verkkovahvisteinen orgaaninen rappaus, jonka paksuus on 3-7 mm. Palovaatimusten täyttämiseksi tehdään myös paksuhkoja epäorgaanisia rappauksia (>13 mm). Solumuovieristeisen ohutrappauksen rakenne on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10. Solumuovieristeinen lämpörappaus /8/.

Rappaus-solumuovimenetelmässä eristeen ja alustan sekä rappauksen ja eristeen väliset tartunnat ovat suhteellisen jäykkiä. Pinnoite on elastinen. Liikuntasauvoja ei käytetä.

Polystyreenieristeen kanssa käytettävä ohutrappausmenetelmä on esimerkiksi Isora-julkisivujärjestelmä.

4.6.2. MENETELMÄN ANALYSOINTI

Rappaus-mineraalivilla -menetelmä

Rapatut mineraalivillaeristysmenetelmät ovat Suomessa markkinoilla olevista rappauspintaista menetelmistä yleisimmät. Näiden menetelmien väliset erot ovat pieniä, joten niitä voidaan tarkastella yhtenä ryhmänä.

Lämpörappauksella tehdyissä korjauksissa rapattujen talojen alkuperäiseen arkkitehtuuriin kuuluvat värit ja pintakuviointit voidaan toteuttaa. Syvyyserot esim. ikkunoihin ja sokkeliin kasvavat kuitenkin kuten muissakin menetelmissä, ellei ryhdytä muihin toimenpiteisiin, kuten ikkunoiden siirtämiseen tai etuikkunan asentamiseen.

Viistosade sekä sisäpuolelta tuleva vesihöyry aiheuttavat rakenteeseen kosteusrasituksia. Viistosade imeytyy rappaus-mineraalivilla -yhdistelmää käytettäessä rappaukseen, mutta lämmöneristeesen imeytyminen on hidasta. Sadejakson jälkeen rappaukseen imeytynyt kosteus pääsee melko helposti haihtumaan ulkoilmaan. Sisältä tuleva vesihöyry saattaa tiivistyä talvikautena lisäeristeen ja rappauksen väliin. Tiivistyvät vesimäärät ovat kuitenkin pieniä.

Lämpötilavaihtelut aiheuttavat rakenteeseen lämpöliikkeitä. Käyttämällä vaaleita värisävyjä voidaan lämpötilavaihtelujen aiheuttamia rasituksia pienentää.

Rapatut mineraalivillajärjestelmät koostuvat yleensä palamattomista rakennustarvikkeista. Paloturvallisuutta ajatellen ko. järjestelmät ovat siten ongelmattomampia kuin esim. rapatut solumuovijärjestelmät.

Rappaus-mineraalivilla -menetelmällä tehdyissä kohteissa todetut vauriot ovat pääasiallisesti suunnittelu- ja työvirheitä. Maanpinnan alapuolelle tai lähelle maanpintaa ulotettu rappaus imee maasta tai ilmasta kosteutta, joka jäätyessään vaurioittaa rappautta ja irrottaa pintakerroksen. Samanlaisia vaurioita on odotettavissa myös, mikäli veden poisjohtamisesta ei ole huolehdittu. Väärin asennetut ikkunoiden, räystäiden tai kiinnikkeiden vesipellit ja parvekekaadot aiheuttavat herkästi vesivalumia rappauspinnalle.

Pintarappauksessa väri vaihtelut ovat melko yleisiä, mutta ne osittain kuuluvat rappauksen ominaisuuksiin. Rappauksen likaantuvuus riippuu mm. ympäristöolosuhteista ja pinnan karkeudesta. Rappauspintaa voidaan yleensä puhdistaa painepesemällä tai harjaamalla. Mahdollinen liikuntasaumojen puute aiheuttaa rappaukseen halkeilua.

Rapattu julkisivu on herkkä mekaanisille vaurioille. Vaurioalttiimpia kohtia ovat julkisivurappauksen alakulmat sekä seinäosat, joiden vieressä on auto- tai muuta liikennettä. Rappauksen paikkakorjaus on vaikeaa, korjausjäljet näkyvät yleensä aina.

Rappaus-solumuovi -menetelmä

Julkisivun eristäminen orgaanisilla tuotteilla on Suomessa uutta. Keski-Euroopassa sen sijaan orgaanisilla lämpörappausmenetelmillä on pitkät perinteet. Ensimmäinen menetelmä kehitettiin Länsi-Saksassa 1950-luvulla.

Solumuovieristeisessä lämpörappauksessa rakennekerrosten suhteellisen jäykät kiinnitykset estävät rappauksen vapaan liikkumisen. Mikäli pinnoitteen ja lämmöneristeen lämpö- ja kosteusliikkeet ovat erilaiset, syntyy pinnoitteeseen halkeamia. Pinnoitteen elastisuuden johdosta halkeamat ovat kuitenkin yleensä pieniä. Lämpörappatuissa kohteissa Keski-Euroopassa lämmöneristyslevyjen saumakohdissa esiintyy halkeamia yleisesti.

Orgaanisen lämmöneristeen pintakerroksena ovat orgaaniset rappaukset käyttökelpoisia, mikäli ne ovat kemiallisesti yhteensopivia. Orgaaniset rappaukset ovat yleensä kosteutta hylkiviä, joten ne estävät sadeveden tunkeutumisen rakenteeseen. Orgaaniset rappaukset ovat uusina joustavia ja mukautuvat liikkeisiin venymärajojensa puitteissa. Vanhenemisnopeus on paljolti riippuvainen rappauksen koostumuksesta. Koska rappaus on kiinni lämmöneristeessä, on lämmöneristeen vanhenemisella suora vaikutus rappauksen kestävyYTEEN.

Sisäpuolelta tuleva vesihöyry saattaa tiivistyä talvikautena lisäeristeen ja rappauksen rajapintaan. Tiivistyvät vesimäärät ovat kuitenkin yleensä mitättömän pieniä. Virheet ja puutteet veden poisjohtamisessa rakennuksen ulkopinnoilta sekä halkeamat rappauksessa saattavat aiheuttaa suurempien vesimäärien pääsyn rakenteen sisälle. Tämä johtaa tiiviin pinnoitteen kuoriutumiseen ja kuplimiseen. Nämä ovatkin tyypillisiä vaurioita orgaanisissa lämpörappauspinnoissa Keski-Euroopassa.

Muovieristeiden jäykkyys aiheuttaa vaatimuksia eristettävän pinnan tasaisuudelle. Samoin tulee huolehtia siitä, ettei lämmöneristeen ja eristettävän pinnan väliin jää yhtenäistä ilmarakoa.

Solumuovieristeisten lämpörappausten eräänä heikkoutena on nähty huonosti peittynyt lujite, ts. lasikuituverkko näkyy paikoitellen ohuen rappauspinnan alta.

Useat vauriot ja ongelmat on Euroopassa tiedostettu ja menetelmiä on kehitetty. Ongelmia ei enää entisessä laajuudessa pitäisi esiintyä. Suomessa julkisivupinta joutuu kuitenkin varsin suuren pakkasrasituksen alaiseksi, joka aiheuttaa lisäkysymyksiä mm. orgaanisen rappauksen elastisuudesta alhaisissa lämpötiloissa sekä jäätyneen veden vaikutuksista rakenteen sisällä.

4.7. KUSTANNUKSET

Julkisivun korjausmenetelmien rakennuskustannukset julkisivu-m²:ä kohden vaihtelevat yleensä välillä 400-600 mk/m². Eri menetelmien välillä on kustannuseroja, mutta kustannukset vaihtelevat lähes yhtä paljon myös yhden ja saman menetelmän puitteissa. Tähän vaikuttavat mm. seuraavat syyt:

- työn määrä
- detaljit, kuten ikkuna- ja ovipieliä sekä parvekkeiden liittymät
- liittyvät rakennustyöt
- työtekniikka
- telineratkaisut ja suojaustarve

- paikkakunta
- vuodenaika
- suhdanteet
- kilpailutilanne.

Edellä mainittujen tekijöiden osuus kustannusvaihtelusta on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Kustannusvaihtelun syitä ja niiden merkitys /8/.

| | |
|--|-----------------------------|
| Rakentamiskustannus keskimäärin | 450 mk/m² |
| Kohteen koko | -50...+50 |
| Detaljit | -10...+40 |
| Telineet ym. | 0...+30 |
| Vuodenaika (suojaus) | 0...+20 |
| Paikkakunta | -30...+60 |
| Suhdanteet | -10...+50 |
| Kokonaisvaihtelu | 400...700 |

Seuraavassa on tehty esimerkkitaloon perustuvat yksikkökustannuslaskelmat eri korjausmenetelmien rakennuskustannuksista. Kaikkiin korjauksiin sisältyy lisäeristäminen eristyspaksuudella 50 mm. Kustannustasona on syyskuu 1993 ja rakennuspaikaksi on valittu Helsinki (kalleusluokka I). Esimerkkitalo on kuvassa 4.11.

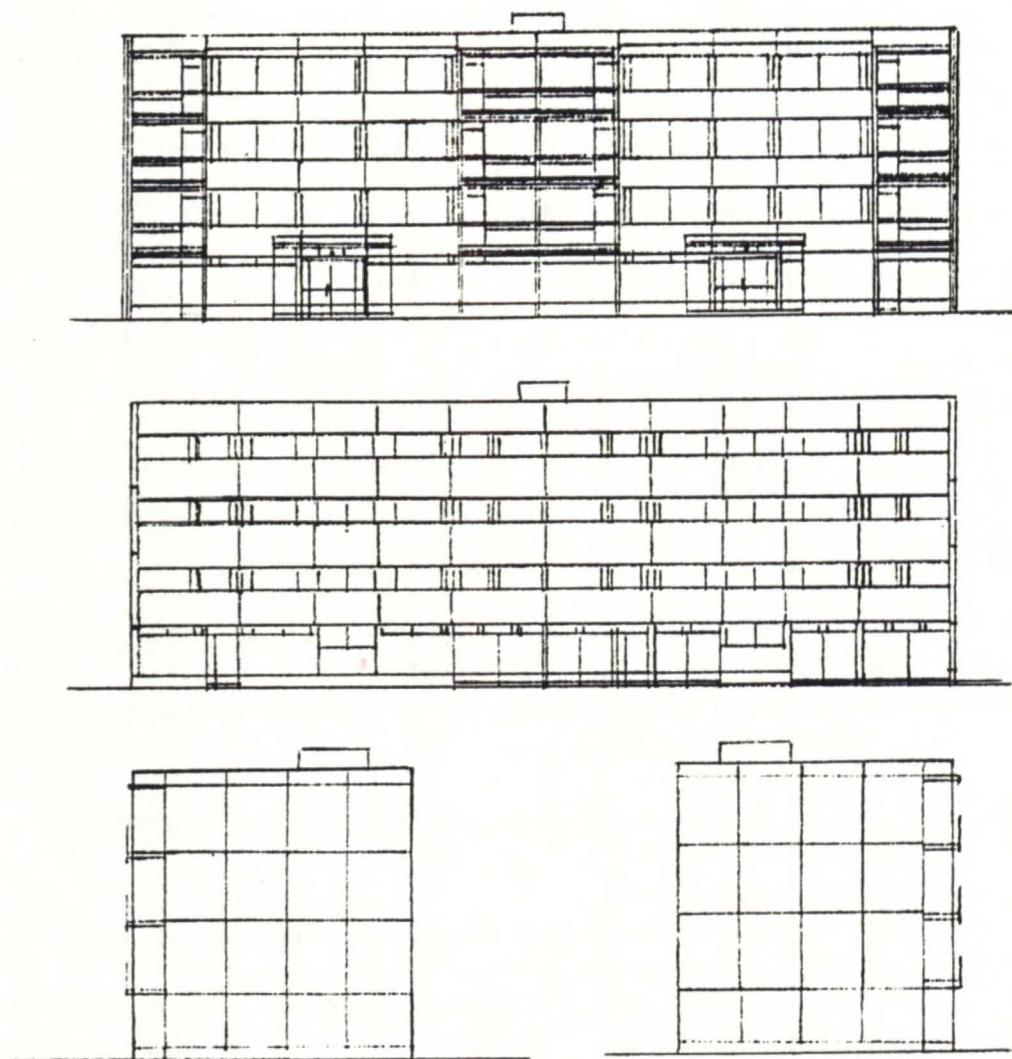
Esimerkkitalon ominaisuudet korjauskustannuksia arvioitaessa ovat seuraavat:

- Rakennusvuosi 1966 - 67
- 3-kerroksinen lamellitalo
- Ulkoseinärakenteena sandwich-elementti, ulkopintana pesubetonipinta
- Päädyissä kantava elementti, pitkillä sivuilla ei-kantava
- Korjaus koskee asuinkerroksien seiniä ja parvekkeiden osalta vain parvekkeen taustaseiniä
- Korjattavan alueen kokonaispinta-ala on 840 m²
- Korjattavia ulkoseinien umpiosia ilman ikkunoita on 550 m²
- Aukkoja 290 m², aukkojen reunapieliä 142 jm, yläpieliä 245 jm ja alapieliä 165 jm
- Ulkokulmia 38 jm
- Päädyn alajuoksu 21 jm
- Sadevesisyökyjä 4 kpl, yht 48 jm

Hankintakustannukset on laskettu tarvikemenekkien ja niiden yksikköhintojen perusteella. Tarvikemenekkeihin sisältyy normaali ainehukka. Tarvikehinnat ovat kohteen koon edellyttämällä alennuksilla laskettuja materiaalien toimittajilta saatuja verollisia hintoja. Hintoihin sisältyvät rahtikustannukset.

Työkustannukset on laskettu työmenekkien ja keskituntiansioiden perusteella. Työmenekkitietoja on saatu julkaistuista menekkitiedostoista, urakoitsijoilta ja materiaalien toimittajilta. Keskituntiansiot kalleusluokassa I on saatu Rakennusteollisuuden Keskusliiton julkaisemasta palkkatilastosta. Käytetyt keskituntiansiot olivat seuraavat:

- mittakirvesmies 67 mk/h
- muurari, rappari 72 mk/h
- IV palkkaryhmän työntekijä 49 mk/h



Kuva 4.11. Laskentakohde, 1960-luvulla rakennettu betonisandwich-ulkoseinäinen lamellitalo.

Sosiaalikuluja on lisätty 60 % palkoista. Työmaan yhteiskustannuksia ja rakentajan yleiskustannuksia on lisätty yhteensä 30 %. Rakennuttajakuluja ei ole laskelmissa otettu mukaan. Näitä kustannuksia ovat mm. suunnittelu-, rahoitus-, valvonta- ja hallintokulut. Niiden suuruus vaihtelee suuresti ollen 3-20 % rakentamiskustannuksista. Edelliseen sisältyen kunnollisen suunnittelutyön kustannukset ovat noin 3-10 % kohteen koosta riippuen. Valittu menetelmä vaikuttaa vaihteluihin vain vähän.

Eri menetelmien osalta yksikkökustannuslaskelmat on esitetty liitteessä 2. Tuloksista on tiivistelmä taulukossa 4.2. Toteutuneiden kohteiden kokonaiskustannukset vuodelta 1993 on saatu kyseisten menetelmien urakoitsijoilta. Hintahaarukka sisältää kohteita, joiden vaativuus vaihtelee helposta melko paljon yksityiskohtia sisältävään tapaukseen.

Taulukko 4.2.

Kevytrakenteisten julkisivukorjausmenetelmien yksikkökustannuksilla lasketut kokonaiskustannukset sekä toteutuneiden kohteiden kokonaiskustannukset.

| Korjausmenetelmä | Laskettu rakentamiskustannus (IX / 93) mk/m ² | Toteutuneet kohteet / 93 mk/m ² |
|--|---|---|
| Julkisivulevyt. Masterstone | 462 | 350-500 |
| Julkisivulevyt. Steni | 507 | 500-600 |
| Metalliohutlevyt. PVF-20 mm | 369 | 350 |
| Metallikasetit. Liberta-järjestelmä. | 467 | 430-450 |
| Rapatut julkisivulevyt. BluClad | 539 | ei ole |
| Rapatut metallikasetit. RR-julkisivu | 657 | 400-500 |
| Elementit. Coloroc | 428 | 350-450 |
| Elementit. Rati | 636 | 500-700 |
| Mineraalivillaeristerappaus. Rappaus-Karhu | 448 | 450-600 |
| Solumuovieristerappaus. Isora-julkisivujärjestelmä | 354 | 350-450 |

4.8. MENETELMIEN VERTAILUUN JA VALINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Julkisivukorjausmenetelmien arvioinnissa ja valinnassa tulee pohtia harkittavana olevien menetelmien kelpoisuutta yleensä sekä sopivuutta nimenomaiseen kohteeseen. Taulukossa 4.3. on esitetty yleisiä sekä kohdekohtaisia korjausmenetelmiin liittyviä kelpoisuuskriteerejä sekä näihin vaikuttavia ominaisuuksia. Monet ominaisuudet vaikuttavat useampienkin kriteerien täyttymiseen, mutta tässä ne on yhdistetty vain yhteen pääasialliseen kriteeriin.

Korjausmenetelmien yleisen kelpoisuuden selvittäminen sisältää pääasiassa materiaalien ja rakenteiden teknisten ominaisuuksien arviointia, joka soveltuu parhaiten kohteen rakennesuunnittelijan tai konsultin tehtäväksi.

Taulukko 4.3.

Korjausmenetelmien arvioinnissa käytettävät kelpoisuuskriteerit.

| Kelpoisuuskriteeri | Ominaisuus |
|-------------------------------------|---|
| Yleinen kelpoisuus: | |
| Mekaaninen toimivuus | Lujuus Kantavuus Lämpö- ja kosteusliikkeiden suuruus Iskunkestävyys Varusteiden asennettavuus |
| Lämpö- ja kosteustekninen toimivuus | Sateenpitävyys Lämmöneristävyys Kosteudenpoisto-ominaisuudet |
| Pitkäaikaiskestävyys | Pakkasenkestävyys Kestävyys kosteusvaihtelujen alaisena Lahoamattomuus, syöpymättömyys Materiaalien yhteensopivuus |
| Ulkonäkö | Värien tasaisuus ja pysyvyys Likaantuvuus Halkeiluominaisuudet Korjausjälkien näkyvyys |
| Turvallisuus | Paloturvallisuus |
| Huollettavuus | Huoltovälit / Huoltovapaus Rakenteiden korjausmahdollisuudet Puhdistettavuus |
| | |
| Kohdekohtainen kelpoisuus: | |
| Ulkonäkö | Sopivuus rakennuksen tyyliin Sopivuus ympäristöön |
| Taloudellisuus | Korjaus-asteen sopivuus suhteessa kuntoon Rakennuskustannukset Käyttö- ja kunnossapitokustannukset Energiansäästö |
| Asumismukavuus | Seinien pintalämpötilat Ääneneristävyys |
| Muut mahdolliset | Arvostukset Kauppaehdot Urakoitsijan luotettavuus Asennusnopeus |

Lisäeristysrakenteen tulee kestää oman painon, tuulikuormien ja normaalista käytöstä aiheutuneiden kuormien yhdistetyt vaikutukset kaikissa ilmasto-olosuhteissa. Kevytrakenteisista julkisivunkorjauksista aiheutuneet painonlisäykset ovat tapauksesta riippuen 10 - 60 kg/m². Näitä ei yleensä tarvitse ottaa huomioon runkorakenteiden lisärasituksena. Korjausrakenteen kiinnitys vanhaan seinään valitaan alustarakenteesta riippuen ja mitoitetaan ottamaan vastaan rakenteesta aiheutuneet kuormat. Mekaanisten kiinnikkeiden tartunta mitataan paikan päällä tehtävällä ulosvetokokeella. Rakenteessa olevien materiaalien lämpö- ja kosteusliikkeet asettavat vaatimuksia materiaalien välisten saumojen, liikuntasaumojen, nurkkien, ikkunanpielien jne.

suunnittelulle. Liikkeiden huomioonottamattomuus aiheuttaa rakenteeseen sisäisiä jännityksiä, halkeamia ja muita pintavaurioita.

Julkisivukorjauksen pintarakenteen iskunkestävyyttä tulee tarkastella paikoissa, missä julkisivu saattaa joutua alttiiksi esim. liikenteen tai ilkvallan aiheuttamille kolhuille. Materiaalin iskunkestävyyttä voidaan tutkia esim. solumuovieristuksen testaukseen tarkoitetulla pudotuskokeella, jossa 1,0 kg tai 0,5 kg painoinen kuula pudotetaan kappaleen päälle 1,0 m tai 0,6 m korkeudelta ja lävistyskokeella, jossa iskukappaleena käytetään erikokoisia kärkikappaleita. Iskunkestävyysvaatimukset on käyttökohteen mukaan jaettu luokkiin I, II, ja III, joissa koetuloksilta vaaditaan tietyt vähimmäisarvot. Vaurioitumistapa tulee myös olla sellainen, ettei rakenne rikkoontuessaan aiheuta vaaraa ympäristölle suurten kappaleiden irtoamisena rakenteesta.

Tärkein korjausrakenteelta vaadittava rakennusfysikaalinen ominaisuus on riittävä kosteudenpoistokyky, joka saadaan aikaan tarpeeksi väljän tuuletusraon avulla tai käyttämällä rakennetta, jossa materiaalien kosteudenläpäisevyys kasvaa ulospäin mentäessä. Lisäksi sateen tunkeutuminen seinärakenteeseen on estettävä. Julkisivukorjauksen yhteydessä asennettavan lisälämmöneristeen lämmöneristyskyky on varmistettava estämällä ilmavirtauksien syntyminen eristerokseen sekä eristeen ja vanhan seinän väliin. Tiivis eristemateriaali saattaa aiheuttaa seinän sisäpuolelta siirtyvän kosteuden tiivistymistä eristeen sisäpinnalle. Tuuletusraollisen rakenteen osalta lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa arvioidaan tarkemmin luvussa 3.

Julkisivun korjausrakenteen tavoiteltavana kestoikänä pidetään 30 vuotta. Lukuunottamatta helposti korvattavia ja huollettavia materiaaleja ja komponentteja materiaalien tulee säilyttää ominaisuutensa kestoajan ajan. Kaikkien materiaalien on oltava pakkasenkestäviä sekä kemiallisesti ja fysikaalisesti stabiileja. Materiaalien on oltava keskenään yhteensopivia ja suojattuja korroosiota, hyönteisiä, lahoa ja jyräjäitä vastaan.

Julkisivupinnan tulee säilyttää värinsä ja patinoitua tasaisesti. Pintarakenteen eri osista ei saa aiheutua julkisivun likaantumista, esimerkiksi näkyvien kiinnitysosien on oltava korroosionkestäviä. Pinnan struktuuri ei saa muuttua ajan kuluessa. Lisäksi mahdollisten korjauskohtien erottuminen julkisivupinnasta ei ole toivottavaa.

Julkisivurakenne ei saa palotilanteessa lisätä henkilövahinkojen riskiä. Suomessa 3- ja useampi-kerroksiset asuintalot on rakennettava palonkestäviksi, mikä edellyttää rakennustarvikkeilta palamattomuutta (luokka A). Levyjen kiinnitykseen saa kuitenkin käyttää enintään 8-kerroksisissa rakennuksissa vähäisessä määrin palavia rakennustarvikkeita. Tuuletusrakoon päin olevat pinnat on palonkestävissä rakennuksissa oltava vaikeasti syttyviä (luokka 1) ja paloa levittämättömiä (luokka 1). Ulkopuolisten pintakerrosten ei tarvitse täyttää luokkavaatimuksia savunmuodostuksen osalta. Lämmöneristämiseen ja tiivistämiseen saa käyttää sellaisia palavia rakennustarvikkeita, jotka ovat tarkoitukseen erikseen hyväksytyjä tai siten asennettuja, että palon leviäminen palavaan eristykseen tai paloteknisestä osastosta toiseen on estetty. Korjausmenetelmän palonkesto-ominaisuuksien kannalta oleellista on ratkaisussa käytettyjen materiaalien ja rakenteiden yhteistoiminta. Yksittäisten materiaalien palo-ominaisuuksilla on vähäisempi merkitys. Ratkaisun palonkestävyyttä voidaan arvioida kokonaisilla rakennekappaleilla tehdyillä polttokokeilla. Tuuletetulla ilmaraolla on korkeissa rakennuksissa palon leviämistä edistävä vaikutus.

Julkisivurakenne tulee voida korjata mahdollisen vaurion sattuessa. Huoltovapaus tarkoittaa valitettavan usein sitä, että rakenteen korjaaminen on vaikeaa tai mahdotonta. Rakenteen tarvitsemat määräaikaishuollot tulee ottaa huomioon sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta. Pintamateriaalin puhdistettavuus sekä puhdistustarve tulee selvittää.

Kohdekohtaisen kelpoisuuden arvioijana on usein palkattu konsultti, arkkitehti tai isännöitsijä. Ensimmäiseksi on syytä arvioida niitä syitä, miksi korjaushankkeeseen on ryhdytty ja mitkä ovat julkisivukorjauksen tavoitteet. Samalla selvitetään ne ulkonäkövaihtoehdot, jotka soveltuvat rakennuskohteen luonteeseen ja ympäristöön. Jos rakennuksen esteettisessä laadussa, arvostuksessa tai ympäristön viihtyisyydessä on puutteita, uusi julkisivuverhous on potentiaallinen keino parantaa tilannetta. Arvioinnin tuloksena syntyy käsitys siitä, tuleeko rakennuksen näyttää rapatulta, tiili- tai levyverhotulta ja mitkä ovat mahdolliset pinnan väri-, saumajako- tai karkeusvaihtoehdot. Myös usean erilaisen pintavaihtoehdon samanaikainen soveltaminen julkisivujen eri osissa on mahdollista.

Mitä enemmän rakennuksen alkuperäistä ilmettä muutetaan, sitä korostuneempi on arkkitehdin rooli kohteen suunnittelussa ja korjausmenetelmän valinnassa.

Kohdekohtaisena kustannusvertailuna eri korjausmenetelmien välillä tulisi olla jollakin investointilaskentamenetelmällä tehty kannattavuuslaskelma. Laskelmassa voidaan ottaa huomioon rakentamiskustannuksiin tehdyn investoinnin vaikutusaika ja eri ratkaisujen mahdolliset kesto-aikaerot sekä lisäeristämisen vaikutus seinän lämpökustannuksiin. Pelkkien rakennuskustannusten perusteella tehty vertailu ovat virheellisiä ja harhaanjohtavia, koska monet aikaan tai käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin liittyvät seikat jäävät tällöin ottamatta huomioon. Lisäeristämisen kaltaisia pitkävaikutteisia korjaustoimenpiteitä tulisi mieluiten tarkastella rakennuksen koko käyttöajan perspektiivistä.

Korjattavassa kohteessa saattaa olla asumismukavuuteen vaikuttavia puutteita, joita voidaan julkisivukorjauksen yhteydessä korjata. Tällaisia tekijöitä voivat olla esim. vedon tunne, ulkoseinien pintalämpötilojen alhaisuus sekä huono ääneneristävyys. Lisäksi ympäristön surkea ulkonäkö on myös yksi asumismukavuuteen vaikuttava tekijä. Puutteiden vakavuus määrää niiden painoarvon korjausmenetelmää valittaessa.

Lisäksi on muita kohdekohtaisia tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa korjausmenetelmää valittaessa, kuten asukkaiden ja ympäristön arvostukset sekä itse asennustyöhön ja urakointiin liittyvät tekijät, kuten asennusaika ja korjausaikaiset vaikutukset asumisviihtyvyyteen. Nämä ovat vaikeasti arvioitavia mutta usein kustannusten ohella hyvin merkittäviä valintaa ohjaavia tekijöitä, varsinkin kohteissa, joissa asukkaat itse vaikuttavat korjausmenetelmän valintaan.

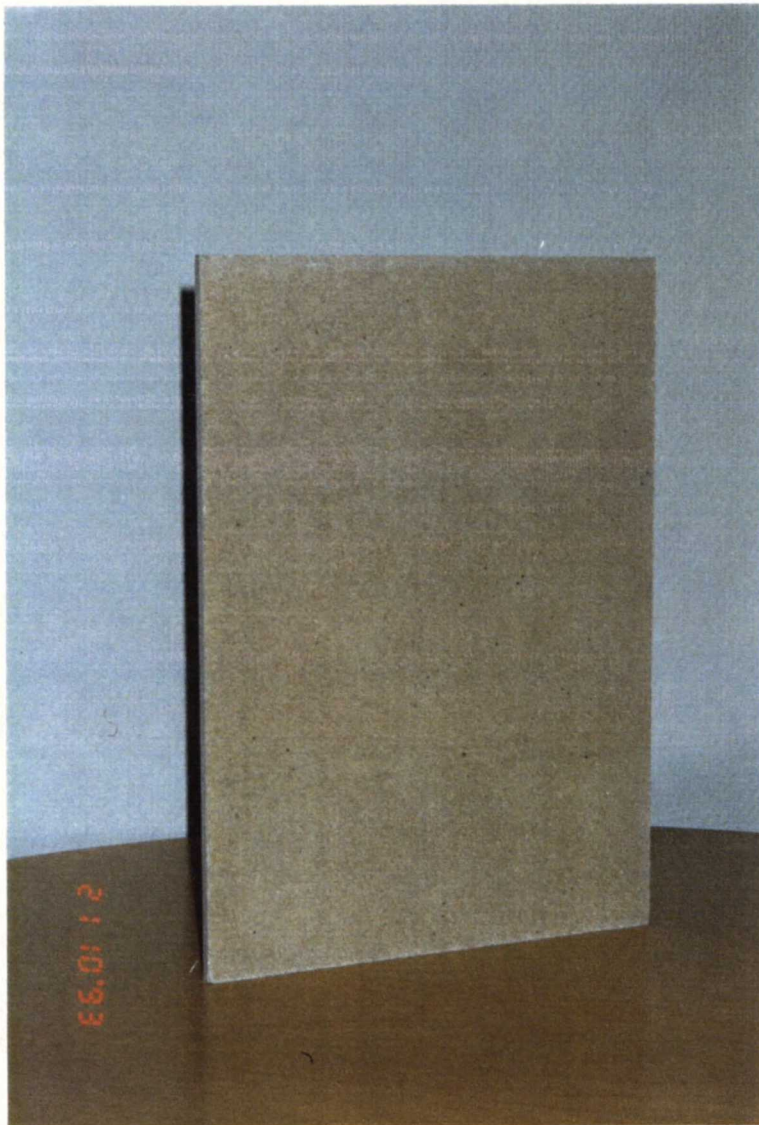
5. SAUMALLISEN LEVYKORJAUSMENETELMÄN KELPOISUUS KALSIUMSILIKAATTIPOHJAISIA JULKISIVULEVYJÄ KÄYTTÄEN

5.1. MENETELMÄN KUVAUS

5.1.1. LEVYTIEDOT

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-julkisivulevyjä valmistetaan Englannissa ja valmistajana on Cape Boards Ltd, kansainvälinen rakennuslevyjen tuottaja. Levyjen materiaalina on selluloosakuiduilla ja epäorgaanisilla täyteaineilla vahvistettu kalsiumsilikaatti. Valmistuksessa rakenne ensin laminoidaan, sen jälkeen puristetaan hydraulisesti oikeaan paksuuteen, kuivataan ja lopuksi käsitellään autoklaavimenetelmällä.

Masterclad on vaaleanharmaa pinnoittamaton levy (kuva 5.1.). Sitä voidaan käyttää julkisivuissa joko pinnoittamattomana, pinnoitettuna tai yhdistelmäpaneelina.



Kuva 5.1. Masterclad-julkisivulevy.

Masterclad-levyn tiheys ja levymitat ovat seuraavat:

| | | |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Tiheys | 1500 | kg/m ³ |
| Pituus x leveys (vakiokoot) | 2500 tai 3000 x 1200 | mm |
| Erikoiskoot tilauksesta | | |
| Paksuus: | 4,5 6,0 8,0 10,0 12,0 | mm |
| Sallittu poikkeama paksuudessa: | +/- 0,5 | mm |

Masterclad-levyt leikataan kovapalateräisellä leikkurilla. Poraamiseen käytetään kovametalliporaa. Levyn pH-arvo on 7 - 10, joten se on heikosti emäksinen. Emäksenkestäviä pohjäkäsittelyjä ei kuitenkaan tarvita, vaan levy soveltuu käytettäväksi muiden tavallisten rakennusmateriaalien kanssa. Ulkotiloissa on estettävä suora kosketus alumiinin kanssa suojaavan pinnoitteen tai eristenauhan avulla. Levyn maalauksessa parhaaseen tulokseen päästään käyttämällä pohjamaalina ohennettua akryylipohjustetta. Pintamaalaus voidaan tehdä ulkokäyttöön soveltuvilla emulsioilla, kalkkimaaleilla, efektimaaaleilla tai kiiltomaaleilla. Pinnan rappaamista ei suositella, paitsi jos levyyn kiinnitetään metalliverkko tartunnan varmistamiseksi.

Masterclad-levyt varastoidaan vaakasuunnassa tasaisella alustalla siten, että alustuet sijoitetaan leveyssuuntaan ja ne sijaitsevat vähintään metrin välein. Ulkotiloissa levyt varastoidaan peitettynä. Levyt eivät sisällä asbestia, eivätkä muita mineraali- tai tekokuituja, joten niiden käsittelyssä ei tarvita erityisiä varotoimia. Levyissä ei myöskään ole kyllästysaineita.

Masterstone-levyssä on luonnonkivipinnoite, joka on kiinnitetty pohjamateriaalina olevaan Masterclad-levyyn epoksihartsilla (kuva 5.2.). Levy pinnoitetaan Suomessa ja kivipinnoitteita on kahdeksaa eri sävyä. Levypaksuudet ovat 6 mm ja 8 mm plus kivirouhepinta ja levykoot ovat samat kuin Mastercladissa. Erikoismittaiset levyt leikataan valmiiksi tehtaalla ennen pinnoittamista. Masterstonen painot ovat:

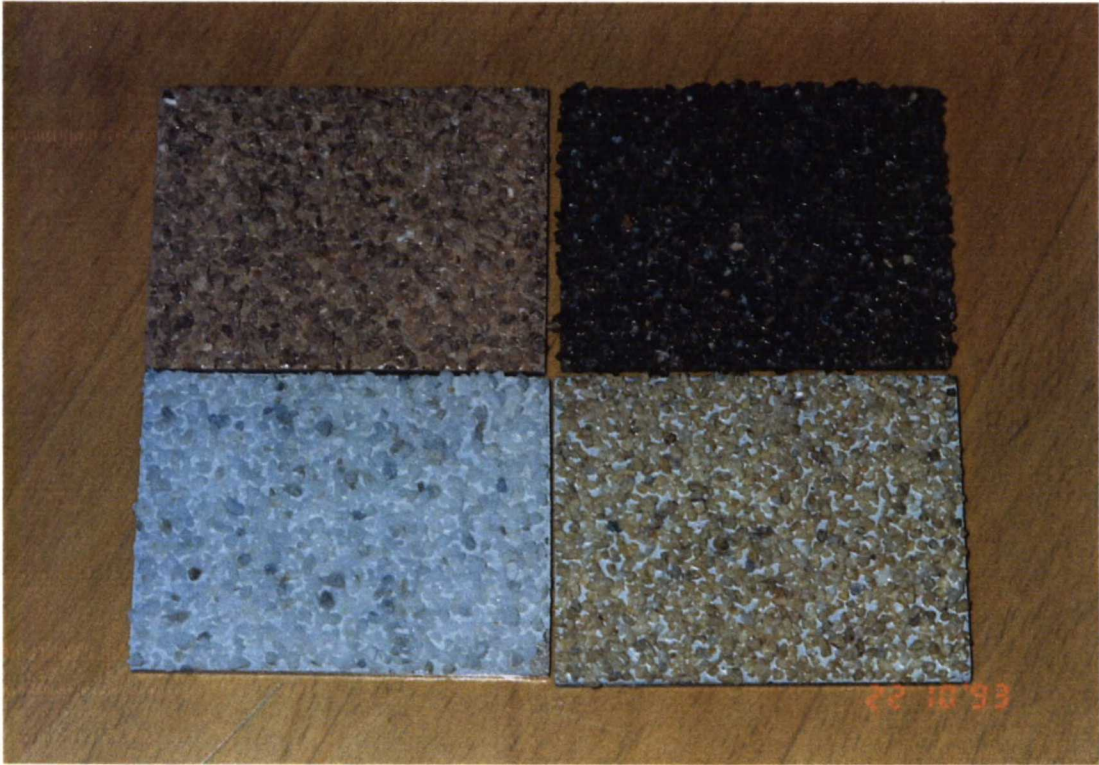
| | |
|------------------------|--------|
| 14,0 kg/m ² | (6 mm) |
| 16,7 kg/m ² | (8 mm) |

Levyn työstössä käytetään samoja työkaluja kuin Masterclad-levyllä, mutta Masterstone leikataan ainoastaan taustapuolelta.

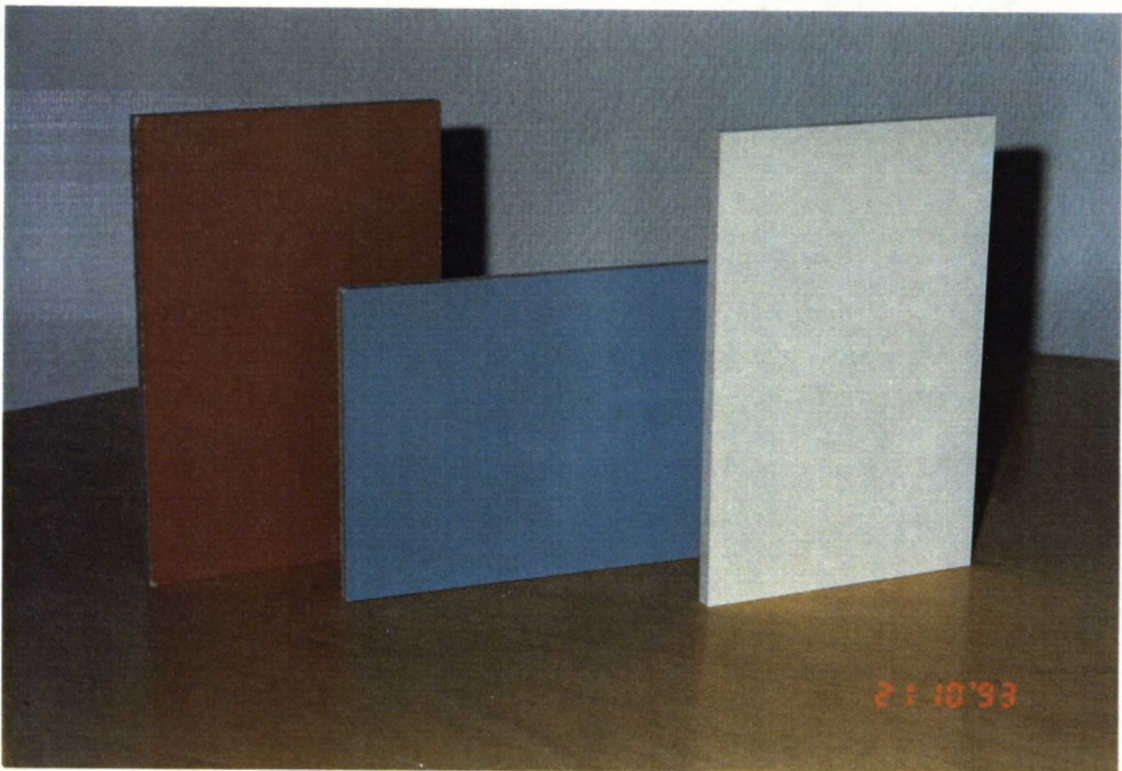
Chromaclad-julkisivulevyssä pohjamateriaalina oleva Masterclad-levy on valmiiksi pinnoitettu muoviakryylipinnoitteella. Pinnoitteita on 25 eri väriä. Chromacladin levymitat ovat seuraavat:

| | | |
|------------------------------|------------------|----|
| Pituus x leveys (vakiokoot): | 2440 x 1196/1220 | mm |
| | 3048 x 1196/1220 | mm |
| Paksuus: | 4.5, 6 ja 9 | mm |

Levyn työstömenetelmät ovat samoja kuin Masterclad-levyllä. Lisäksi levyjen käsittelyssä tulee varoa maalipinnan vaurioitumista. Levyjä leikattaessa painetaan maalipintaa vasten toisen levyn, esim. ylimääräpalan maalipinta, jottei maali lohkeile leikkauskohdasta.



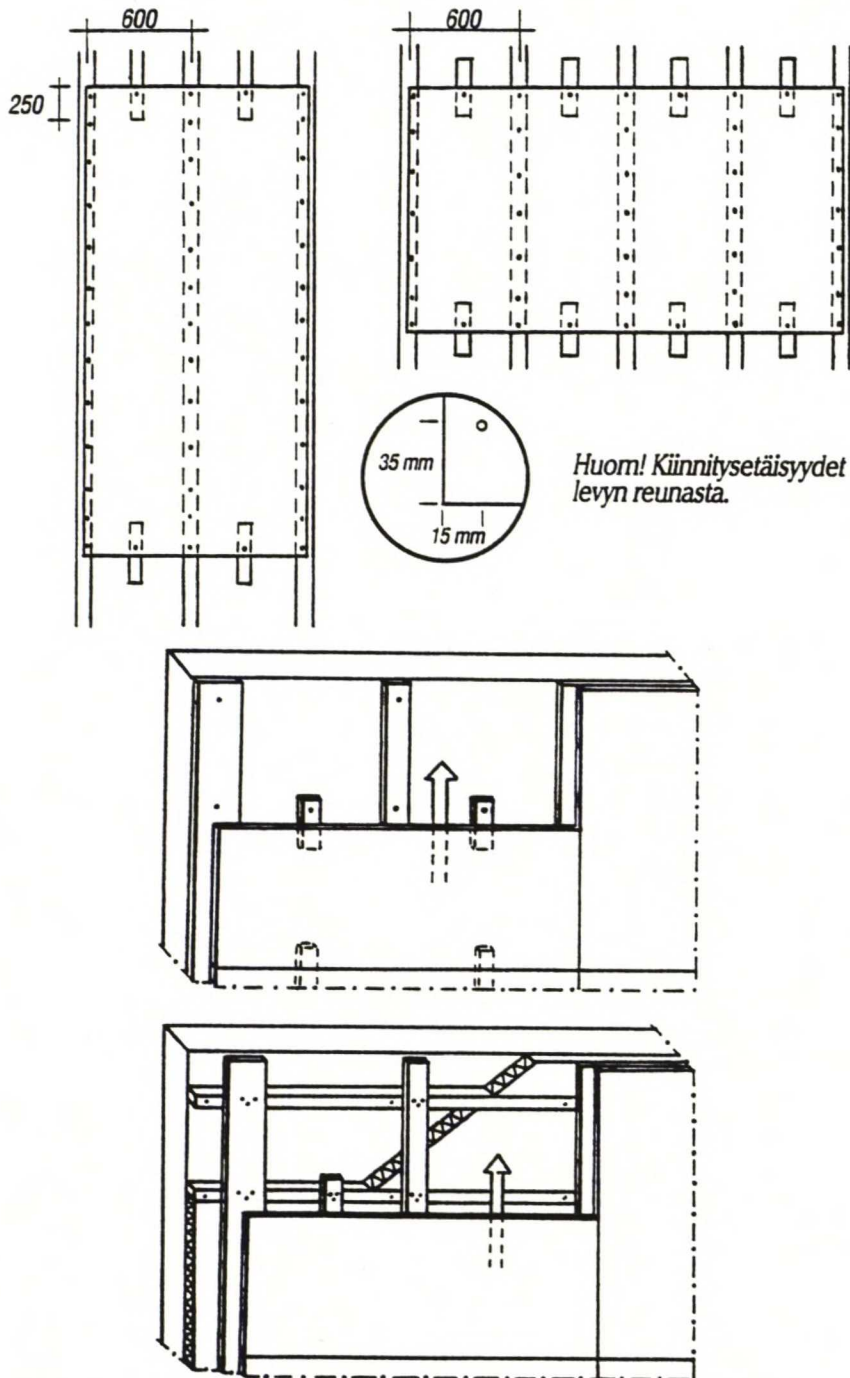
Kuva 5.2. Masterstone-julkisivulevy.



Kuva 5.3. Chromaclad-julkisivulevy.

5.1.2. RAKENNERATKAISUT JA DETALJIT

Julkisivulevyrakenne toteutetaan tuuletettuna siten, että levyn taakse jää vähintään 20 mm tuuletusväli. Tavallisimmin levy asennetaan pystysuoralle painekyllästetylle ja kuivatulle puukoolaukselle. Metallikoolaus käy myös, jos metallin korroosio ja lämpöliikkeet huomioidaan. Kuvassa 5.4 on esitetty Masterstone-levyn rakennerratkaisu 8 mm levyä ja puukoolausta käytettäessä. Levyt voidaan asentaa sekä pystyyn että vaakaan.



Kuva 5.4. Masterstone levyn kiinnityskohdat ja rakennerratkaisu lisäeristyksellä sekä ilman /10/.

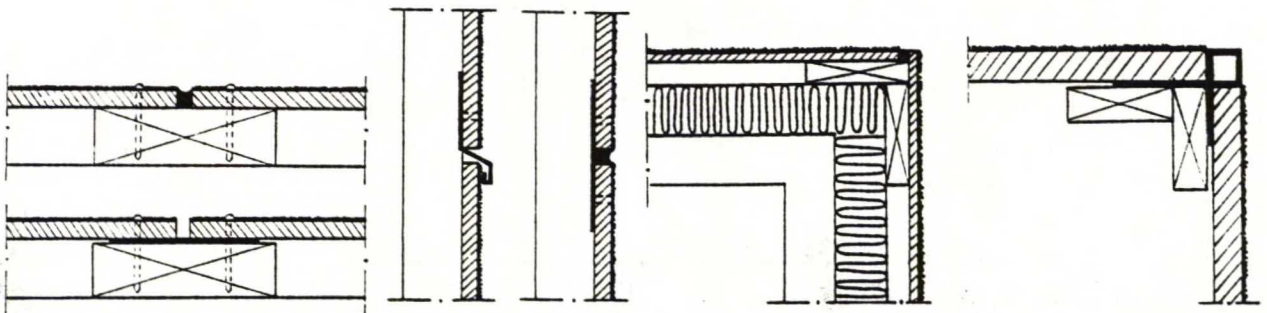
Mastercladin ja Chromacladin puukiinnitykseen käytetään leveäkantaisia ruostumattomia nauvoja tai ruuveja. Masterstone kiinnitetään haponkestävillä, levyn väriin maalatuilla kampa-nauloilla tai haponkestävillä harvakierreruuveilla. Metallikoolauksessa käytetään ruostumatonta itseporautuvaa ruuvia. Masterstonen naulauksessa käytetään tuurnaa levyn pinnan rikkoutumisen estämiseksi. Yli 6 mm paksuihin levyihin porataan etukäteen 2 mm ylisuuret reiät. Kiinnitysetäisyydet on annettu taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1.

Levyjen kiinnitysetäisyydet /10/.

| LEVYTYYPPI | Masterclad, Chromaclad | | | Masterstone | |
|-------------------------------------|------------------------|------|---------|-------------|------|
| Levypaksuus | 4,5 mm | 6 mm | 8-12 mm | 6 mm | 8 mm |
| Vaakatukipisteet, maksimietäisyys | 400 | 600 | 600 | 400 | 600 |
| Maksimikiinnitysväli levyn reunassa | 400 | 400 | 600 | 250 | 250 |
| Maksimikiinnitysväli levyn keskellä | 400 | 400 | 600 | 250 | 250 |
| Minimietäisyys levyn reunasta | 12 | 12 | 12 | 15 | 15 |
| Minimietäisyys levyn nurkasta | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Maksimietäisyys levyn nurkasta | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |

Levyt voidaan asentaa joko avosaumaisena tai saumat massattuina. Avonaisessa pystysaumassa sauman alle laitetaan joko kumikaista (EPDM), silikonikaista tai levyn sävyinen pinnoitettu peltikaista. Vaaka-avosaumoissa käytetään pinnoitettua metalliprofiilia. Massatuissa saumoissa käytetään elastista levyn väristä saumausainetta, joista suositellaan silikonipohjaisia massoja. Vaakasauomoissa saumausaineen kiinnitysalustana käytetään peltikaistaa. Sauma- ja kulma-ratkaisut on esitetty kuvassa 5.5. Levysaumojen minimileveydet ovat taulukon 5.2. mukaiset.



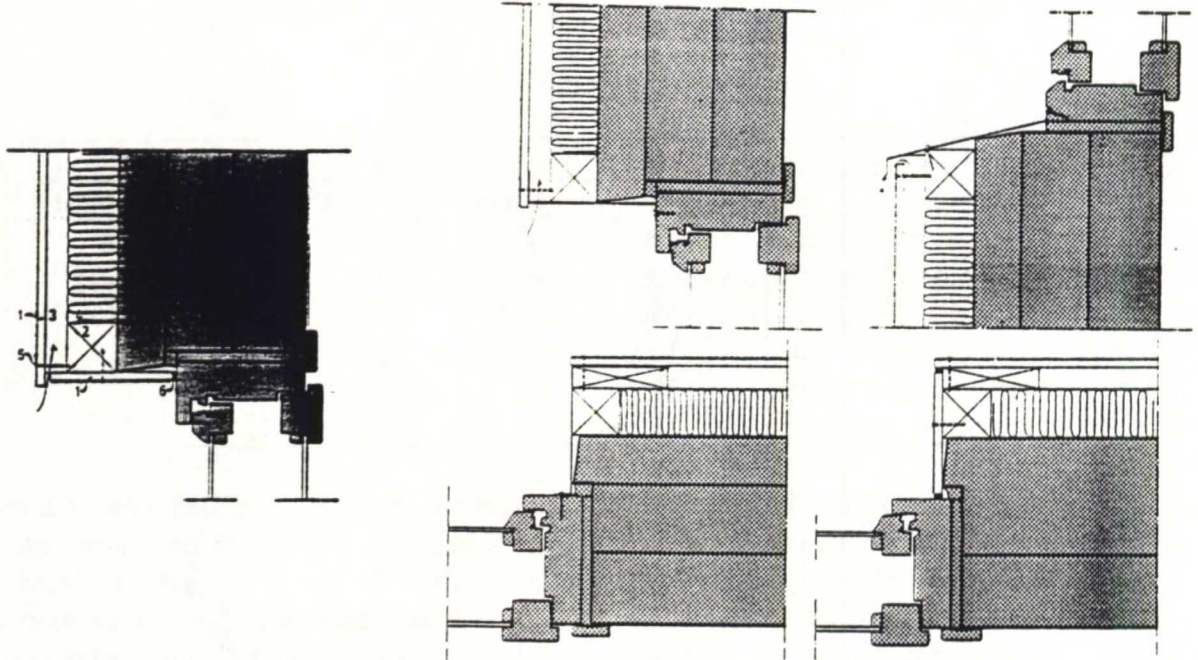
Kuva 5.5. Levyrakenteen sauma- ja kulmadetaljit /10/.

Taulukko 5.2.

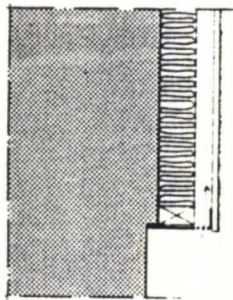
Levysaumojen minimileveydet /10/.

| Pituus / leveys (mm) | Avosauma (mm) | Massattu sauma (mm) |
|-------------------------|------------------|------------------------|
| 1200 | 2 | 4 |
| 2500 | 2,5 | 8 |
| 3000 | 3 | 10 |

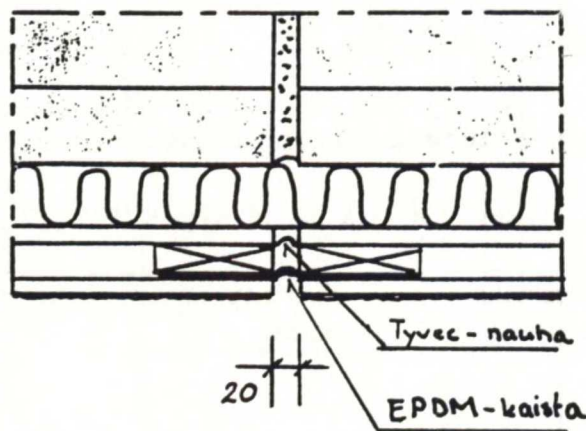
Ikkunapieli voidaan tehdä puusta, muovipinnoitetusta pellistä tai myös levymateriaalista erilaisilla saumaratkaisuilla. Ikkunapielidetaljeissa käytettyjä vaihtoehtoja on esitetty kuvassa 5.6. Seinän ja sokkelin liittymässä käytetään esim. sinkittyä ja rei'itettyä peltiä (kuva 5.7.). Liikuntasaumat tehdään pohjaseinässä olevien liikuntasaumojen kohdalle sekä korjausrakenteen pinnan liittyessä vanhoihin pintoihin. Esimerkki pystysuuntaisen liikuntasauaman rakenteesta on esitetty kuvassa 5.8. ja vaakasuuntaisen liikuntasauaman rakenteesta kuvassa 5.9.



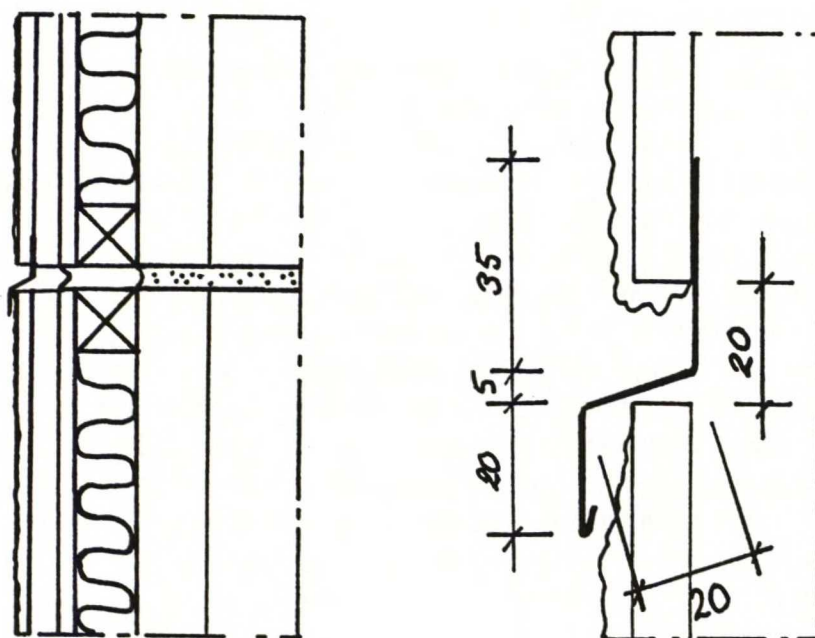
Kuva 5.6. Ikkunanpielidetaljeja.



Kuva 5.7. Sokkeliliittymä.



Kuva 5.8. Pystysuora liikuntasäuma.



Kuva 5.9. Vaakasuora liikuntasäuma.

5.2. MEKAANINEN TOIMIVUUS

5.2.1. LEVYMATERIAALIN MEKAANISET OMINAISUUDET

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-levyjen tiheyttä, lujuutta sekä elämistä kosteus- ja lämpötilavaihtelujen alaisena verrataan muihin vastaaviin markkinoilla oleviin verhouslevyihin taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Julkisivulevyjen tiheyksien, lujuuksien ja liikkeiden vertailu.

| Julkisivulevy | Masterclad + Chromaclad | Masterstone | Steni | Classic Luja (pituuss. / poikkis.) | Cemstone (ajosuunta / poikkisuunta) |
|---|-------------------------------|-------------|-------------|--|---|
| Tiheys (kg/m ³) | 1500 | 2100 | 2000 | 1700 | 2400 |
| Taivutuslujuus kuivana | 29 | 29 | 60 | 25 / 20 | 25 / 19 |
| märkänä (N/mm ²) | 15 | 15 | n. 60 | 18 / 15 | 18 / 15 |
| Kimmokerroin kuivana | 16 | 16 | 7,6 | 10 / 9 | 15 / 12 |
| märkänä (GN/m ²) | 10 | 10 | n. 7,6 | 7 / 6 | 10 / 8 |
| Lämpölaajeneminen (mm/m°C) | 0,009 | 0,009 | 0,021-0,026 | 0,009 | 0,009 |
| Kosteuseläminen 30 - 90 % RH (mm/m) | 1 | 1 | 0,3 | 2,0 | 1,8 |

Steni on polymeeri-betonilevy ja Classic Luja sekä Cemstone ovat kuitusementtiä. Stenissä ja Cemstonessa on Masterstonen tavoin kivirouhepinta ja Classic Luja on Mastercladin tapainen peruslevy, jota voidaan käyttää julkisivuissa sellaisenaan tai pinnoitettuna. Kuitusementtilevyjen ominaisuudet ovat keskenään hyvin samankaltaisia, paitsi että Classic Luja on hauraampi levy kuin Cemstone ja kivirouhepintainen levy on luonnollisesti painavampi kuin pinnoittamaton levy. Näihin verrattuna kalsiumsilikaattilevyt ovat hieman kevyempiä ja lujempia, ja lisäksi kosteuseläminen on kuitusementtilevyihin verrattuna pienempää. Eniten muista levymaterialeista eroaa polymeeri-betoni, jonka johdosta Steni on muita levyjä lujempi ja hauraampi. Kosteusvaihtelut eivät sanottavasti vaikuta Stenin ominaisuuksiin, mutta materiaalin lämpölaajeneminen on yli kaksinkertainen muiden levyjen lämpölaajenemiseen verrattuna. Ääriolosuhteissa Stenin lämpölaajeneminen on luokkaa 2,5 mm/m, kun muilla levyillä suurimmat muodonmuutokset aiheutuvat kosteusvaihteluista ollen kuitusementtilevyillä taulukon mukaan n. 2,0 mm/m ja Mastercladilla, Chromacladilla ja Masterstonella n. 1,0 mm/m. Molemmat ympäristötekijät huomioon ottaen kalsiumsilikaattilevyjen muodonmuutokset ovat siis muita levyjä pienempiä.

5.2.2. KESTÄVYYS TUULIKUORMIA VASTAAN

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-levyjen maksimitukivälit normaaleilla tuulikuormilla on annettu taulukossa 5.1.

Levyille voidaan laskea taulukoiden 5.4 ja 5.5. mukaiset maksimitukivälit ulkorakenteissa tasaisen kuorman vaikuttaessa. Taulukko 5.4. koskee tilannetta, jossa Masterclad-levyä käytetään pinnoittamattomana julkisivurakenteen ulommaisena verhouksena, jolloin rakenteen kimmo-kertoimena on käytetty arvoa 3 GN/m², ja taulukko 5.5. koskee pinnoitettua Masterclad-levyä sekä Masterstone:a ja Chromaclad:ia, jolloin rakenteen kimmokerroin on 6 GN/m². Taulukoissa ei ole otettu huomioon levyn kiinnitykseen käytettyjen naulojen tai ruuvien vaikutusta.

Taulukko 5.4. Pinnoittamattoman Masterclad-levyn maksimitukivälit tasaisella kuormituksella.

| | Tasainen kuorma (N/m ²) | | | | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 300 | 400 | 600 | 800 | 1200 | 1400 | 2000 | 2400 | 2800 | 3000 |
| Levy-paksuus | Maksimitukiväli (taipuma) (mm) | | | | | | | | | |
| 8 mm | 600 (2,00) | 400 (0,52) | 400 (0,78) | 400 (1,04) | 400 (1,56) | 300 (0,60) | 300 (0,83) | 300 (1,00) | 300 (1,17) | 300 (1,25) |
| 10 mm | 600 | 600 | 600 (2,03) | 400 (0,53) | 400 (0,80) | 400 (0,94) | 400 (1,34) | 400 (1,60) | 300 (0,59) | 300 (0,63) |
| 12 mm | 600 | 600 | 600 | 600 (1,56) | 600 (2,34) | 400 (0,54) | 400 (0,77) | 400 (0,92) | 400 (1,08) | 400 (1,15) |

Taulukko 5.5.

Pinnoitetun Masterclad-levyn sekä Masterstonen ja Chromacladin maksimitukivälit tasaisella kuormituksella.

| | Tasainen kuorma (N/m ²) | | | | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 300 | 400 | 600 | 800 | 1200 | 1400 | 1600 | 2400 | 2600 | 3000 |
| Levy-paksuus | Maksimitukiväli (taipuma) (mm) | | | | | | | | | |
| 6 mm | 600* (2,33) | 400 (0,62) | 400 (0,92) | 400 (1,23) | 300 (0,58) | 300 (0,69) | 300 (0,78) | 300 (1,17) | | |
| 8 mm | 600 | 600 (1,33) | 600 (2,00) | 400 (0,53) | 400 (0,80) | 400 (0,93) | 400 (1,07) | 400 (1,59) | 300 (0,55) | 300 (0,63) |
| 9 mm** | 600 | 600 | 600 (1,40) | 600 (1,87) | 400 (0,55) | 400 (0,64) | 400 (0,74) | 400 (1,10) | 400 (1,20) | 400 (1,38) |
| 10 mm | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 (2,03) | 600 (2,37) | 400 (0,53) | 400 (0,80) | 400 (0,87) | 400 (0,99) |

*) 6 mm paksun Masterstone:n maksimitukiväli on 400 mm.

**) vain Chromaclad:lla esiintyvä levypaksuus.

Taulukossa 5.6. on esitetty tuulenpaineen suuruudet eri tuulen nopeuksilla.

Taulukko 5.6.

Tuulen nopeuden aiheuttama paine /41/.

| Tuulen nopeus | Tuulen paine | Tuulen vaikutus |
|---------------|--------------|---|
| m/s | p = Pa | |
| 0 - 0,2 | 0,02 | Savu nousee suoraan ylös |
| 0,3- 1,5 | 0,06- 1,4 | Tuulen voi juuri tuntea |
| 1,6- 3,3 | 0,6 - 6,8 | Jaksaa juuri nostaa viirin |
| 3,4- 5,4 | 7,2 - 18,2 | Viiri hulmuu |
| 5,5- 7,9 | 18,9 - 39,0 | Lippu liehuu ja ohuet oksat liikkuvat |
| 8,0-10,7 | 40,0 - 71,6 | Pienet lehtipuut huojuvat |
| | | järvissä vaahtopääläineita |
| 10,8-13,3 | 72,0 -119,0 | Suuret oksat heiluvat, puhelinlangat laulavat |
| 13,9-17,1 | 120,7 -182,7 | Kokonaiset puut huojuvat |
| | | vastatuuleen vaikea kulkea |
| 17,2-20,7 | 184,9 -267,8 | Oksia katkeilee, vaikea kulkea ulkona |
| 20,8-24,4 | 270,4 -372,1 | Talot vaurioituvat, kattotiiliä putoilee |
| 24,5-28,4 | 375,2 -504,1 | Puita irttaa juurineen |
| | | huomattavia rakennusvaurioita |

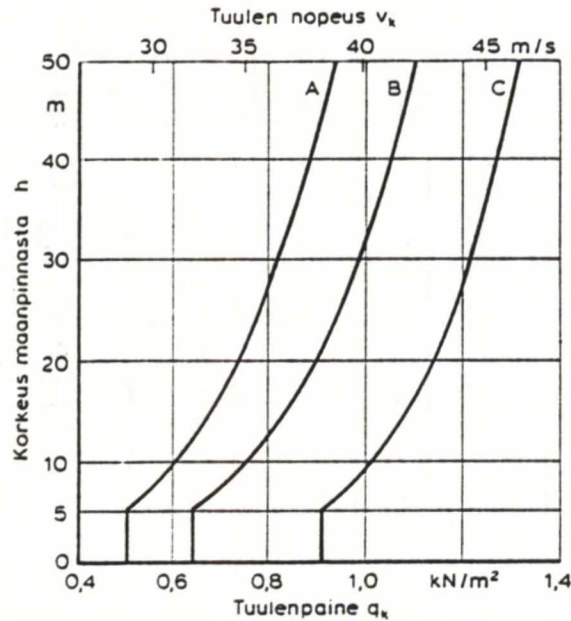
Normaalitilanteessa suurimmaksi Suomessa esiintyväksi tuulenpaineeksi voidaan arvioida n. 300 Pa, jolloin annetut maksimitukivälit ovat riittäviä. Mitoitettaessa tuulen vaikutuksille alttiita pintoja lähteen /32/ mukaisesti seinän taivutusmomentin aiheuttavat tuulivoimat lasketaan kaavalla 5.1. kuvassa 5.10. annettujen tuulenpaineiden sekä rakennuksen aukoista ja tuulen suunnasta riippuvien painekertoimien avulla.

$$q_w = \mu \cdot q_k \quad (5.1.)$$

q_w = staattinen tuulikuorma seinälle (kN/m²)

μ = painekerroin

q_k = tuulenpaine



Kuva 5.10. Tuulenpaine q_k /40/.

- Alue A: Manneralue ja sen välittömässä läheisyydessä sijaitsevat suuret saaret.
 Alue B: Meren rannikkoalue ja Ahvenanmaa.
 Alue C: Merialue (ulkosaaret ja luodot).

Asuinkerrostaloissa, joissa kaikilla seinillä on likimain sama tiiviys, painekerroin saa maksimis-
 saan arvon 1,0.

Nähdään, että esim. alueella A kolmikerroksiselle rakennukselle laskettava tuulenpaine on n.
 600 kN/m², jolloin pinnoittamattomalle 8 mm paksulle Masterclad:lle, pinnoitetulle 6 mm
 Masterclad:lle sekä 6 mm Chromaclad:lle annettu maksimitukiväli on jo riittämätön. Raken-
 nuksen korkeuden kasvaessa ja siirryttäessä tuulisempiin olosuhteisiin Srmk:n mukaiset
 mitoitusluulenpaineiden arvot suurenevät, joten varsinkin ohuilla levyillä ja meren läheisyy-
 dessä tukivälien pituus tulee mitoittaa kohdekohtaisesti.

Masterclad-levyn tuulen aiheuttaman imukuorman kestävyyttä on tutkittu Englannissa Harry
 Stanger Ltd:n laboratoriossa. Koe suoritettiin levypaksuuksille 4,5, 6, 9, ja 12 mm, jotka oli
 kiinnitetty puuraameihin eri tavoilla. Koekappaleet olivat 1,2 x 1,2 m² levyjä, joissa tukiväli oli
 400 mm levypaksuudelle 4,5 mm ja 600 mm muille. Ennen koetta koekappaleet upotettiin
 veteen 24 tunniksi huoneenlämmössä. Kokeessa puuraamien vastakkainen puoli kiinnitettiin
 vastalevyyn niin, että tutkittavan levyn ja vastalevyn väliin jäi tiivis ilmatila. Kokeen aikana
 mitattiin ilmatilan painekuormaa ja levyn taipumaa eri kohdissa. Tehollinen kuormitusalue oli
 tukien välisellä alueella. Kuorman voimakkuutta näillä alueilla käytettiin koko levyalaan vaikut-
 tavan tasaisen kuorman laskemiseen. Taulukossa 5.7. on esitetty kokeen tuloksena saadut tuu-
 len aiheuttaman imukuorman maksimiarvot.

Taulukko 5.7.

Tuulen aiheuttaman imukuorman kestävyyskokeen tulokset
Masterclad-levylle.

| Koekpl | Paksuus (mm) | Kiinnitystapa | Kiinnitysvälit reunassa keskellä | | Maksimikuorma (kN/m ²) |
|--------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------------|
| 1 | 4,5 | 8 mm levynaula | 200 | 400 | 191 |
| 2 | 6 | Kartiopääruuvi | 200 | 400 | 178 |
| 3 | 6 | Kuusiopääruuvi, kanta 13 mm | 200 | 400 | 222 |
| 4 | 6 | Kuusiopääruuvi, kanta 19 mm | 200 | 400 | 267 (350) |
| 5 | 9 | uppokantaruuvi | 300 | 600 | 182 |
| 6 | 12 | uppokantaruuvi | 400 | 600 | 346 |
| 7 | 12 | Kuusiopääruuvi, kanta 19 mm | 400 | 600 | 480 |

Kaikki muut koekappaleet paitsi nro. 4 rikkoontuivat siten, että keskitukipuussa olevien kiinnikkeiden kannat tulivat levystä läpi. Levyn nro. 4 tapauksessa levy murtui viivamaisesti keskipuussa olevien kiinnikkeiden suuntaisesti, mutta suuremmalla kuormalla kuin muut 6 mm levyt. Murtumisen jälkeen rakenne kesti kuorman lisäämisen 350 kN/m² asti, jolloin keskitukipuun kiinnikkeet tulivat levystä läpi. Saadut maksimikuormat, joissa hajoaminen tapahtui, riippuivat enemmän kiinnitystavasta kuin levyjen paksuudesta. 6 mm paksuilla levyillä kiinnittimistä riippuvat lujuudet vaihtelivat 178 -350 kN/m², johon alueelle sijoituivat myös tulokset, jotka saatiin paksuuksilla 9 mm ja 12 mm uppokantaruuveja käyttäen. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että tarvittaessa suurta tuulen aiheuttaman imukuorman kestävyttä rakenteessa on edullista käyttää kiinnittimiä, joissa on mahdollisimman suuri, tasapohjainen kanta.

Suomessa seinä rakenteelle kohdistuva mitoittava tuulen imukuorma lasketaan kaavan 5.2. mukaan. Kerrostaloille, joissa kaikilla seinillä on keskimäärin sama tiiviys, maksimi paine-kerroin imukuormalle on -0,9, jolloin kuvan 5.10. perusteella imukuorma merialueilla 50 metrin korkeudessa on n. 1,2 kN/m². Nähdään, että kaikilla kokeessa tutkituilla rakennevaihtoehdoilla saavutetut maksimikuormat olivat yli satakertaisia mitoittavaan tuulen imukuormaan nähden, joten levyrakenteella saavutettava tuulen aiheuttamien imukuormien kestävyys on hyvä, valittiinpa kiinnitysratkaisuksi mikä tahansa kokeessa käytetyistä kiinnitysmenetelmistä.

5.2.3. KANTAVUUS

Käytettäessä Masterclad:a, Masterstonea tai Chromaclad:a julkisivun saneerauksessa tulee korjausrakenteen paino maksimissaan olemaan n. 25 kg/m² ilman lämmöneristettä ja alle 40 kg/m² lämmöneristeen kanssa. Näitä ei yleensä tarvitse ottaa huomioon runkorakenteiden lisärasituksena ja perustusten vahvistamista ei normaalitapauksissa tarvita.

Rakenteen kiinnittäminen vanhaan seinä rakenteeseen suunnitellaan aina tapauskohtaisesti alusrakenteen materiaalista ja kunnosta sekä ympäristöolosuhteista riippuen. Pohjana tälle suunnitelmalle on korjattavan seinän kuntotutkimus. Sandwich-elementtiseinän tapauksessa kuntoarviolla selvitetään, joudutaanko ulkokuoren kiinnitys sisäkuoreen varmistamaan lisä-ankkuroinnilla tai mahdollisesti koko ulkokuori purkamaan. Korjausrakenne voidaan kiinnittää ulkokuoren läpi sisäkuoreen tai tietyssä suhteessa molempiin kuoriin. Yleisimmin käytettyjä kiinnikkeitä ovat erilaiset lyöntiankkurit. Kiinnikkeiden tartuntalujuudet määritetään tekemällä

tartuntavetokokeet paikan päällä. Vanhan julkisivurakenteen ollessa ei-kantava uuden korjausrakenteen kuormat johdetaan kantaviin rakenteisiin, kuten kantaviin väliseiniin, laattaan, pilareihin tai palkkeihin.

5.2.4. ISKUNKESTÄVYYS

Masterclad:n iskunkestävyyskoe suoritettiin Englannissa Cape R & D -laboratoriossa eri paksuisille (4,5, 6, 9, 12 ja 20 mm) levyille ja eri kosteuspitoisuuksille verraten tuloksia muiden materiaalien iskutestityteen. Koe tehtiin standardin BS (British Standard) 8200 mukaisesti siten, että 0,5 kg teräspallo (halkaisija 50 mm) pudotettiin eri korkeuksilta tutkittavan materiaalin päälle. Tutkittavat kosteudet olivat n. 8 % (kosteustila n. 50 % suhteellisessa kosteudessa) kaikille paksuuksille sekä lisäksi 6 mm paksulle levyille 2 % (kuivattu) ja 25 % (kyllästetty). Ennen koetta tutkittavat levyt saatettiin haluttuun kosteustilaan ja kiinnitettiin vaakasuoraan puukehikkoon, jossa tukiväli oli 4,5 mm levyn osalta 400 mm ja muilla paksuuksilla 600 mm. Teräspallo pudotettiin kasvavalta korkeudelta ensin n. 200 mm välein ja rikkoontumisen lisääntyessä pienemmin välein. Standardin mukaan materiaalin iskutestityttä osoittaa energia, joka aiheuttaa materiaalista riippuen etupinnan rikkoontumisen tai 1 mm syvemmän kuopan.

Iskuenergia saadaan kaavasta 5.3.

$$E = g \cdot M \cdot H \quad (5.3.)$$

E = iskuenergia (Nm)

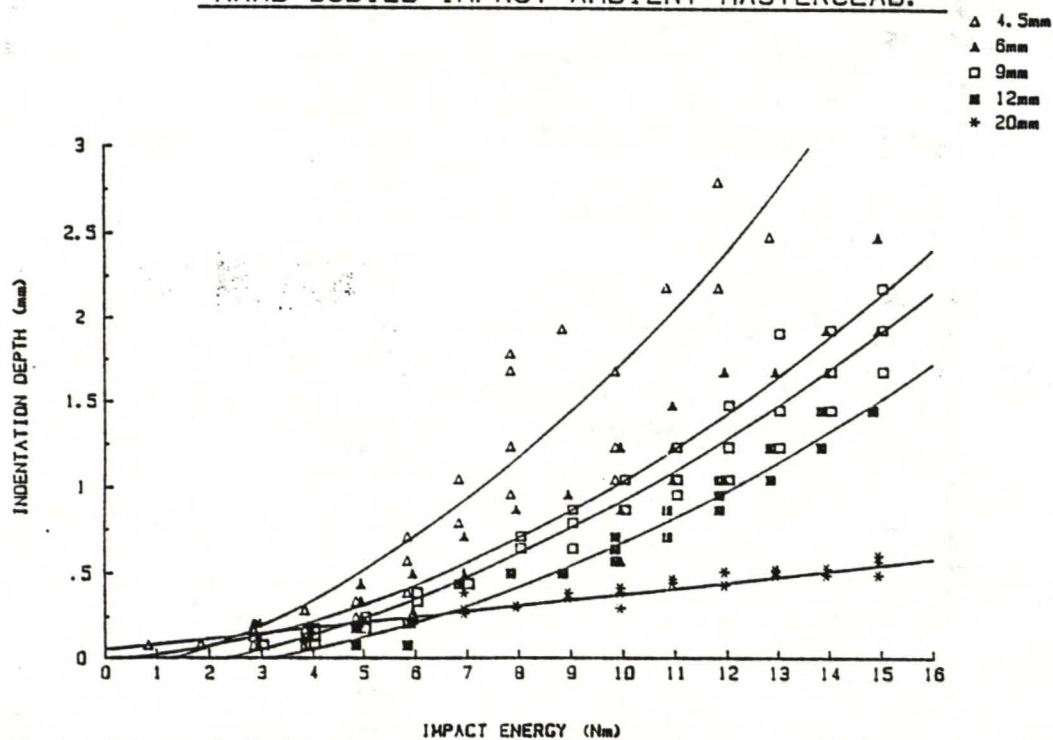
g = 9,81 m/s²

M = teräspallon massa (kg)

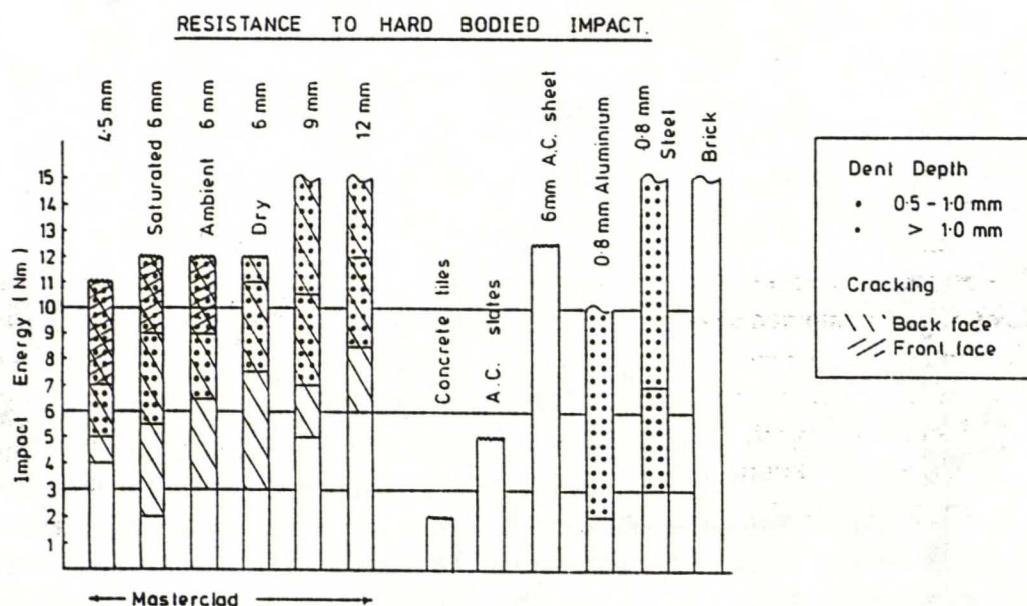
H = pudotuskorkeus (m)

Mastercladin rikkoutuminen tapahtui edellä olevien vaurioitumismekanismien yhdistelmänä. Tämä epätavallinen vaurioitumistapa mutkistaa Mastercladin tuloksien tulkintaa. Vaurion suuruus oli riippumaton pudotuskohdan etäisyydestä tukipuuhun. Syntyneiden painumien koko ja repeämien pituudet tallennettiin aluella 1 - 15 Nm, välin ollessa 1 Nm. Kuvassa 5.11. on esitetty painuman syvyyden ja iskuenergian välinen suhde viidellä levypaksuudella ympäröivän ilman olosuhteissa. Mitatut painumasyvyydet olivat paljon pienempiä kuin laskettu arvo, joka saadaan pinnalle jäävän jäljen halkaisijan ja teräspallon halkaisijan avulla. Tämä ristiriita johtuu materiaalin palautumisesta iskun jälkeen. Kun painuman syvyys kasvoi yli 0,15 mm, levyn takapinta kohosi iskukohdassa ja pieniä paikallisia repeämiä syntyi takapinnalle, mutta ei etupinnalle (kuva 5.12.). Painuman syvyyden kasvaessa nämä repeämät kasvoivat varsinkin levyn heikompaan suuntaan. Iskuenergiat, jotka aiheuttivat repeämiä sekä etu- että takapinnalle, on esitetty kuvassa 5.12. kaikille levypaksuuksille ja kosteuspitoisuuksille. Kuvassa näkyvät myös iskuenergiat, jotka aiheuttivat 0,5 mm ja 1,0 mm painumat. Etupuolen repeämien kasvaessa yli 250 mm katsottiin levyn rikkoutuneen hauraan vaurioitumismekanismien mukaisesti (4,5 mm ja 6 mm levyt). Levypaksuuksilla 9 mm ja 12 mm ei havaittu etupinnan repeilemistä 15 Nm iskuenergialla.

HARD BODIED IMPACT-AMBIENT MASTERCLAD.



Kuva 5.11. Mastercladin iskutitkeyscoe. Painuman syvyydet iskuenergialla 1 - 15 Nm.



Kuva 5.12. Mastercladin iskutitkeyscoe. Levyjen vaurioituminen eri levypaksuuksilla ja eri kosteuspitoisuuksissa (6 mm levy). Vertailu muihin julkisivumateriaaleihin.

Eri kosteuspitoisuuksilla saadut tulokset osoittavat levyn haurauden riippuvuuden materiaalin kosteuspitoisuudesta. Levyn kuivuessa sen pinta muuttuu kovemmaksi ja tietyllä iskuenergialla painuma on pienempi kuin kosteammilla levyillä. Repeämiä ei myöskään synny yhtä helposti, mutta synnyttyään ne leviävät nopeammin. Niinpä kuivassa levyssä ei näkynyt repeämiä ennen kuin 12 Nm iskuenergialla, mutta synnyttyään nämä repeämät olivat 300 mm pitkiä.

Mastercladin monimutkaisen vaurioitumismekanismin vuoksi siihen ei voida suoraan soveltaa normin BS vaurioitumislukittelua:

Hauras materiaali - rikkoutuminen

Muut materiaalit -pinnan vaurioituminen ja painuma.

Niinpä Mastercladin iskusitkeyttä kuvaamaan on otettu kaksi vaurioitumista kuvaavaa arvoa: Painuman syvyys suurempi kuin 1 mm ja etupinnan rikkoutuminen. Paikallisen repeilyn takapinnassa katsotaan liittyvän painuman syntymiseen. Levy kestää useita tällaisia painumia lähekkäin ilman, että repeämät leviäisivät painumasta toiseen tai että se merkittävästi alentaisi levyn iskunkestävyyttä. Kuitenkin tällä tavoin vaurioituneiden levyjen kestävyys tuulikuormaa vastaan huononee jonkin verran. Vaikkakin levyn rikkoutuminen on riippuvainen kosteuspitoisuudesta, niin jo alhaisilla kosteuspitoisuuksilla rikkoutuminen tapahtuu enemmän paikallisesti etenevänä vaurioitumisena kuin hauraana murtumisena. Tämä vähentää henkilö- ja muiden vahinkojen vaaraa vauriotilanteessa.

Muihin materiaaleihin verrattuna Mastercladin käyttäytyminen iskusitkeys-kokeessa vastaa lähinnä asbestisementtilevyä (A.C.), paitsi että asbestisementtilevyn rikkoutuminen tapahtuu hauraammin. Metalliohutlevyyn tulee helposti painumia, mutta se kestää huomattavan iskuenergian ennen lopullista vahingoittumista.

Kokeiden perusteella on Mastercladille annettu seuraavat käyttösuositukset eri paksuuksilla:

- 9 mm: Voidaan käyttää paikoissa, joiden vieressä on yleinen läpikulkua, esim. kerrostalojen alimmissa kerroksissa, mutta ei suositella käytettäväksi erityisen vaativissa olosuhteissa, esim. alttiina ajoneuvoliikenteelle.
- 6 mm: Voidaan käyttää yleisissä paikoissa yli 1,5 m:n korkeudessa tai alempana paikoissa, joissa iskurasituksien mahdollisuus on pieni (yksityistalot).
- 4,5 mm: Yleisillä paikoilla yli 6 m:n korkeudessa tai yli 1,5 m:n korkeudessa paikoissa, joissa iskurasituksien mahdollisuus on pieni.

5.2.5. LÄMPÖ- JA KOSTEUSLIIKKEET

Mastercladin, Masterstonen ja Chromacladin lämpö- ja kosteusliikkeiden suuruudet on esitetty taulukossa 5.3. Kosteuseläminen 3000 mm pitkällä levyllä on maksimissaan 3 mm, joten levyjen asennusvälin tulisi olla 3 mm ja levyjen päissä yhdelle kiinnikkeen reiälle vaadittava liikevara yhteen suuntaan 1,5 mm. Naulan tai ruuvien sijaitessa reiän keskellä tulisi esiporattavan reiän siis olla 3 mm suurempi kuin kiinnikkeen halkaisija. 2500 mm pitkällä levyillä vastaava asennusväli on 2,5 mm ja esiporattavan reiän suuruus 2,5 mm kiinnikkeen halkaisijaa suurempi. Lämpölaajeneminen maksimissaan on kosteuselämisestä pienempää. Käytännön olosuhteissa levyjen esiporauksen 2,0 mm kiinnikettä suuremmaksi yli 6 mm levyillä voidaan katsoa olevan riittävä, sillä levyjä kiinnitettäessä on suhteellinen kosteus yleensä 65 - 85 %. Tästä kosteustilasta lähdettäessä levyn kosteusvaihtelujen vaikutuksesta tapahtuva kutistuminen ja laajene-

minen tapahtuvat eri suuntiin, joten maksimikosteuselämisellä arvioitu liikevara on tarpeettoman suuri. Taulukossa 5.2. annetut saumojen minimileveydet ovat riittäviä, sillä ne ovat maksimikosteuselämisestä suuruksia tai sitä leveämpiä.

5.3. RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

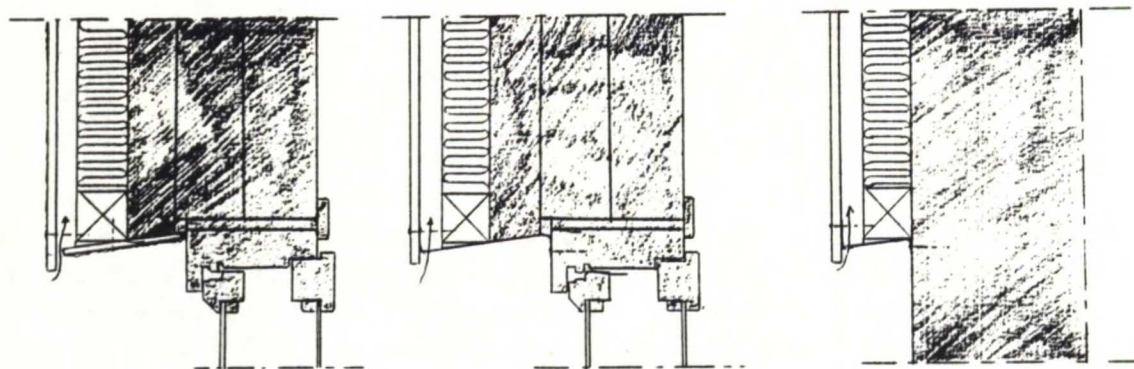
5.3.1. SATEENPITÄVYYS

Mastercladin vedenpitävyys on tutkittu englantilaisen standardin (BS 4624: 1981, osa 3, kappale 15) mukaisesti, ja tutkimuksessa materiaali todettiin vedenpitäväksi. Vaakasuoraan asetetun levyn yläpintaa kuormitettaessa vedellä ei alapintaan muodostunut vesipisaroita. Pinnoittamattoman levyn veden absorptio on täysin kyllästettynä n. 24 %, joka vastaa puun veden absorptiota, ja vesihöyrynvastus on $1,286 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$.

Luvussa 7.1. on kokeellisesti tutkittu Masterstone-julkisivurakenteen avosauma- ja kiinnitysratkaisujen sateenpitävyyttä. Tulosten perusteella levyverhouksen sateenpitävyys riippuu ratkaisevasti käytetystä kiinnitysmenetelmästä. Levyjen naulakiinnitys tulisi jättää pois käytöstä, sillä naulanreivistä rakenteeseen tunkeutunut vesimäärä oli huomattava sekä esiporaamattomia että esiporattuja kiinnitysreikiä käyttäen. Tutkituista kiinnitysmenetelmistä oli toimivin ruuvikiinnitys (ruuvit $4,2 \times 32 \text{ mm}$), jossa ruuvin kannan (13 mm) alle oli sijoitettu 2,4 mm paksu neopreenieriste (halkaisija 9 mm). Kiinnitysratkaisu ei aiheuttanut vesivuotoja rakenteeseen. Ruuvin esiporattu ruuvinreikä oli tehty siten, että samalla tasoitettiin eristeen kohta poistamalla kivet poranterään kiinnitetyllä jyrsimellä (halkaisija 9 mm). Mastercladin ja Chromacladin tiiviiseen kiinnittämiseen käynee samanlainen eristetty ruuvikiinnitys tavallisella esiporauksella. Tutkittavaksi valitut avosaumarakenteet, jotka olivat levyn pystysaumassa EPDM-kumikaista ja pinnoitettu metallikaista sekä vaakasaumassa pinnoitettu metallinen vaakasaumalista, toimivat sadetuskokeessa tyydyttävästi. Täysin vesitiiviiksi avosaumarakennetta ei voida saada, sillä levyreunoista imeytyy kosteutta levymateriaaliin, mutta imeytyneet kosteusmäärät ovat sen verran pieniä, etteivät ne haittaa rakenteen toimintaa.

Luvussa 8.1. esitetty säärasituskoe osoitti rakenteen liittymädetaljien merkittävyyden rakenteen sateenpitävyydessä. Vaikka levyrakenne itsessään olisi esimerkillisen sateenpitävä, saattaa huonosti suunniteltujen ja toteutettujen rakenneyksityiskohtien, kuten seinässä olevien vesipeltien kohdalta päästä huomattavia määriä vettä rakenteeseen. Näiden liittymädetaljien huolellinen kohdekohtainen suunnittelu ja työn laadun valvonta työmaalla on siis ensiarvoisen tärkeää.

Mahdollisesti vesivuotoina tuuletusrakoon pääsevän ja tiivistyskautena rakenteeseen kertyvän ja alaspäin valuvan kosteuden poistamiseksi ikkunan yläosassa ja sokkeliliittymässä tulisi yleisesti käytettyjen liittymädetaljien (kuvat 5.6. ja 5.7.) sijasta käyttää rakenteita, jotka vaakasaumaltaan viettävät seinästä pois päin siten, että levyn taakse mahdollisesti joutunut vesi valuisi pois seinän luota ja pääsisi poistumaan tuuletusreikien kautta (kuva 5.13.).



Kuva 5.13. Vaakaliittymien parannettuja ratkaisuja: ikkunan yläpieli ja sokkeliliittymä.

5.3.2. LÄMMÖNERISTÄVYYS

Julkisivukorjauksen yhteydessä usein tehtävällä lisälämmöneristyksellä parannetaan vanhan seinän lämmöneristyskykyä. Luvussa 3.2.1. on esitetty joitain tyypillisiä suomalaisissa kerrostaloissa esiintyviä ulkoseinärakenteita ja näiden k-arvoja. Julkisivulevyillä tehtävässä korjauksessa lisälämmöneristeenä käytetään yleensä pehmeätä mineraalivillaa yhdistettynä tuulensuojalevyyn. Toisena vaihtoehtona on jäykkä tuulensuojapaperilla päällystetty mineraalivilla. Edellisessä tapauksessa eristelevyt asennetaan k 600 vaakakoolausten väliin ja rakenteen ulommat kerrokset kiinnitetään koolauksiin. Jälkimmäisessä tapauksessa eriste kiinnitetään pohjaseinään muovikiinnittimillä ja eristeen päälle tuleva pystykoolausta kiinnitetään suoraan eristekerroksen läpi.

Taulukossa 5.8. on annettu edellä selostettuja lämmöneristerakenteita käyttäen tarvittavat lisäeristepaksuudet kuvassa 3.5. oleville ulkoseinärakenteille, kun tavoitteena on Srmk:n k-arvo-vaatimus ulkoseinärakenteille. Laskennassa on käytetty normaalia Srmk:ssa esitettyä k-arvon käsinlaskentamallia, kun rinnakkain sijaitsevien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuudet poikkeavat toisistaan enintään nelinkertaisesti. Jäykän eristelevyn tapauksessa ulkopuolisen seinärakenteen kiinnitysosista johtuva kylmäsilta-vaikutus on otettu huomioon otaksumalla k-arvon kasvavan 5 %.

Massiivirakenteille saadut tarvittavat lisäeristepaksuudet on sulkeissa, koska seinien todellista lämmöneristyskykyä ei voida arvioida pelkän k-arvon avulla. Massivirakenteiden k-arvoon nähden hyvä lämmöneristävyys perustuu hyvään lämpökapasiteettiin. Jäykän mineraalivillan maksimivalmistuspaksuus on 60 mm. Tarvittaessa suurta lisälämmöneristyspaksuutta voidaan käyttää myös rakennetta, jossa jäykkä tuulensuojavilla asennetaan pehmeän mineraalivillan ja vaakakoolausten päälle.

Taulukko 5.8.

Pehmeätä mineraalivillaa ja tuulensuojalevyä tai jäykkää tuulensuojapaperilla päällystettyä mineraalivillaa käyttäen tarvittavat lisäeristepaksuudet erilaisille ulkoseinä rakenteille, kun tavoitteena on Srmk:n k-arvo vaatimus $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

| Seinä rakenne | | Pehm. min. villa (mm) | Jäykkä min. villa (mm) |
|---|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| Kahden kiven savitiiliseinä | | (160) | - |
| Seinä höyrykarkaistusta kevytbetonista ja betonista | | (150) | - |
| Umpibetoniseinä | paksuus 150 mm | (200) | - |
| | 250 mm | (200) | - |
| | 350 mm | (190) | - |
| Yhden kiven savitiiliseinä ja kevytbetoni | | (130) | - |
| Seinä höyrykarkaistusta kevytbetonista | | (120) | - |
| Sandwich-teräsbetonielementti | lämmöneriste 75 mm | 90 | 60 |
| | 100 mm | 50 | 40 |
| | 125 mm | 10 | 10 |
| Tiiliseinä ja mineraalivillaeristys | lämmöneriste 75 mm | 100 | - |
| | 100 mm | 80 | 50 |
| | 125 mm | 50 | 40 |
| Kantava betonielementti | lämmöneriste 75 mm | 90 | 60 |
| | 100 mm | 50 | 30 |
| | 125 mm | 10 | 10 |

Julkisivulevyillä tehtävässä korjausrakenteessa oleva tuuletusrako vaikuttaa parantavasti seinän lämmöneristyskykyyn. Tuuletusraon ja verhoulevyn vaikutus lisälämmöneristetyin rakenteen k-arvoon voidaan ottaa huomioon luvussa 3.4.3. annetun kaavan 3.34. avulla.

Taulukossa 5.9. on laskettu seinärakenteen k-arvo tuuletusraon paksuudella 20 mm ja pituuksilla 1,5 m, 2,8 m ja 8,4 m, jotka seinärakenteessa kuvaavat esim. kahden ikkuna-aukon välistä, yhden kerroksen korkuista ja kolmen kerroksen korkuista tuuletusraon pituutta. Tuulen nopeudet ovat 0 m/s, 5 m/s ja 10 m/s, joista 5 m/s vastaa lähinnä Suomessa esiintyvää tammi-kuun kuukausikeskiarvoa. Auringon säteilyn vaikutusta ei huomioida.

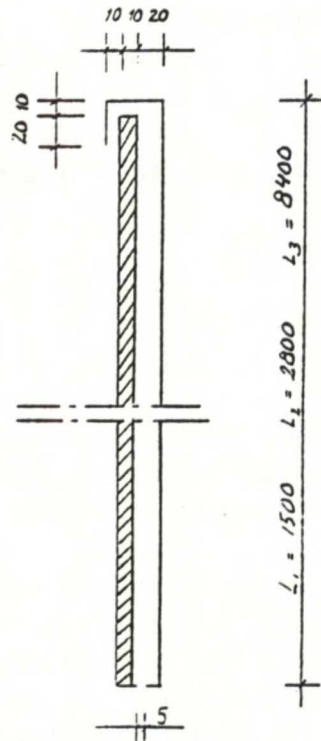
Laskennassa tarvittavat tuuletusraon rakenteen pintalämpötilat ovat keskiarvoja tuuletusraon pintalämpötiloista, jotka on laskettu TKK:n Talonrakennustekniikan laboratoriossa tehdyllä RAKO-tietokoneohjelmalla. Ohjelmassa käytetty rakomalli näkyy kuvassa 5.14. Raon päiden välisenä muotokertoimien erotuksena on käytetty arvoa 0,1 kaikilla raon pituuksilla lähteessä /5/ esitettyjen julkisivujen painekertoimien jakaumaa esittävien kaaviokuvien perusteella. Ulko- ja sisälämpötiloina on käytetty arvoja $T_u = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Käytetty ulkolämpötila vastaa Suomessa kylmimpien talvikuukausien kuukausikeskiarvoa.

Mastercladin lämmönjohtavuus on $0,29 \text{ W/mK}$ (BS 874: Osa 2: Kappale 2.1: 1986), joten Masterclad-levyn (10 mm) lämmönläpäisykerroin on $36,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja varsinaisen seinärakenteen lämmönläpäisykerroksena on käytetty arvoa $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Taulukko 5.9.

Tuuletusraollisen rakenteen keskimääräinen lämmönläpäisykerroin eli k -arvo ($\text{W/m}^2\text{K}$) raon leveydellä 20 mm ja raon pituuksilla 1,5 m, 2,8 m ja 8,4 m, kun otetaan huomioon tuuletusraon vaikutus.

| Tuuletusraon pituus (m) | Tuuli 0 m/s Paine-ero suluissa | Tuuli 5 m/s Paine-ero 1.68 Pa | Tuuli 10 m/s Paine-ero 6.71 Pa |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1,5 | 0,245 (0,11 Pa) | 0,254 | 0,257 |
| 2,8 | 0,244 (0,23 Pa) | 0,252 | 0,254 |
| 8,4 | 0,243 (0,81 Pa) | 0,251 | 0,252 |



Kuva 5.14. RAKO-ohjelmassa käytetty rakomalli.

Laskettujen tulosten perusteella voidaan todeta lämmönläpäisykerroimen olevan riippuvainen virtausnopeudesta raossa, kun tuuletusrako ja sen ulkopuolinen verhous otetaan huomioon. Virtausnopeus taas on riippuvainen tuuletusraon päiden välisestä paine-erosta. Savupiippu-vaikutuksella (tuuli 0 m/s) virtaukset tuuletusraossa ovat hitaita, jolloin tuuletusraon ilma ehtii lämpiämään paremmin kuin tuulen vaikuttaessa ja S_{rmk} :n mukaisesti laskettu lämmönläpäisykerroin voi parantua n. $0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tuuletusraon korkeuden kasvaessa raon lämpötila saavuttaa vakioarvon, ja sen vuoksi 8,4 m korkealla tuuletusraolla ei saada tarjoakaan parempaa lämmöneristävyyttä kuin korkeudella 2,8 m.

Edellä olevassa tarkastelussa ei ole otettu huomioon auringon säteilyn vaikutuksia tuuletusraon lämpötiloihin. Taulukossa 5.10. on annettu taulukon 5.9. tuulennopeuksia ja tuuletusraon pituuksia vastaavat k -arvot, kun seinäpintaan vaikuttaa auringon säteilyteho 400 W/m^2 , joka on keskimääräinen arvo pilvettömänä päivänä eteläseinälle tammikuussa Helsingissä.

Taulukko 5.10.

Tuuletusraollisen rakenteen keskimääräinen lämmönläpäisykerroin (k-arvo W/m^2K) raon leveydellä 20 mm ja raon pituuksilla 1,5 m, 2,8 m ja 8,4 m, kun otetaan huomioon tuuletusraon vaikutus. Seinäpintaan vaikuttaa säteilyteho $400 W/m^2$.

| Tuuletusraon pituus (m) | Tuuli 0 m/s Paine-ero suluissa | Tuuli 5 m/s Paine-ero 1.68 Pa | Tuuli 10 m/s Paine-ero 6.71 Pa |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1,5 | 0,021 (1,08 Pa) | 0,182 | 0,212 |
| 2,8 | 0,011 (2,30 Pa) | 0,169 | 0,202 |
| 8,4 | 0,009 (8,33 Pa) | 0,151 | 0,186 |

Auringon säteilyn vaikutus seinän lämmönläpäisykertoimeen on merkittävä varsinkin tuulennopeudella 0 m/s. Jo 1,5 m korkealla tuuletusraolla lämpötila tuuletusraon yläosassa on jopa korkeampi kuin seinän sisäpinnan lämpötila, jolloin saadaan negatiivisia paikallisia k-arvoja. Tuulennopeuden kasvaessa auringon säteilyn vaikutus pienenee. Nopeudella 0 m/s k-arvon parannus verrattuna auringottomaan tapaukseen on keskimäärin $0,23 W/m^2K$, nopeudella 5 m/s $0,09 W/m^2K$ ja nopeudella 10 m/s $0,05 W/m^2K$. Merkittävästä vaikutuksesta huolimatta auringon säteilyn vaikutusta rakenteen pitkäaikaiseen lämmönläpäisykertoimeen ei voida ottaa huomioon, koska säteilyn suuruus muuttuu jatkuvasti pilvisyyden ja vuorokaudenvaihtelujen vaikutuksesta. Esimerkiksi Helsingissä on pilvistä n. 80 % tammikuusta.

Arvioitaessa seinärakenteen pitkäaikaista keskimääräistä lämmönläpäisykerrointa voidaan käyttää tuulen nopeudella 5 m/s saatuja arvoja. Avosaumaisena levyrakenteen tapauksessa ei monikerroksisissa rakennuksissa synny varsinaisia useamman kerroksen korkuisia tuuletusrakojia, sillä ilma pääsee virtaamaan myös levyjen välisistä saumoista. Virtauksen suuruus saumoissa riippuu saumojen leveydestä, muotoilusta ja paikallisista muotokertoimista saumojen kohdalla. Saumojen vaikutusta tuuletusraon virtauksiin ja siten myös lämpötiloihin on vaikea laskennallisesti määrittää, ja tässä tapauksessa helpointa on k-arvon laskennassa ottaa huomioon enintään kerroksen (levypituuden) korkuisen tuuletusraon vaikutus. Tällöin seinän k-arvo verrattuna Srnk:n mukaisesti laskettuun lämmönläpäisykertoimeen voi yhden kerroksen korkuisessa tuuletusraossa (2,8 m) parantua n. $0,03 W/m^2K$.

5.3.3. RAKENTEEN KOSTEUDET JA KOSTEUDENPOISTOKYKY

Ulkoseinärakenteiden on oltava sellaisia, ettei niihin rakennuksen ajatellun käyttöiän aikana kerry diffuusion tai ilmavirtausten takia haitallisessa määrin vettä /32/. Tuuletusraon vaikutuksia korjatun seinärakenteen kosteustekniseen toimintaan on selvitetty kappaleessa 3.3.2. ja kappaleessa 3.4.4. on annettu laskentakaavat, joilla seinärakenteen läpi sisältä tuleva kosteuden määrä ja tuuletusraollisen rakenteen kosteudenpoistokyky voidaan laskea.

Vanhan korjatun seinän läpi diffuusiolla tuuletusrakoon kulkeva kosteuden määrä riippuu kaavan 3.35. mukaisesti seinärakenteen diffuusiovastuksesta. Lähteessä /32/ annettujen materiaalien diffuusiovastusten perusteella voidaan laskea seuraavien tyypillisten korjattavien seinärakenteiden kokonaisdiffuusiovastukset:

- Betonisandwich-seinä (ulkokuori 40 mm, lämmöneriste 100 mm, sisäkuori 70 mm):
 $r_k = 60 \times 10^9 \text{ Ns/kg}$
- Tiilirunkoinen seinä (tiili 130 mm, lämmöneriste 100 mm, tiili 130 mm):
 $r_k = 13,5 \times 10^9 \text{ Ns/kg}$
- Kevytbetoniseinä (290 mm):
 $r_k = 4,3 \times 10^9 \text{ Ns/kg}$

Taulukossa 5.11. on laskettu yllä mainittujen seinärakenteiden läpi diffuusiolla siirtyneen kosteuden määrä vuoden eri kuukausina. Esimerkkipaikkakunnaksi on valittu Jyväskylä. Kuukausittaiset keskimääräiset lämpötilat, suhteelliset kosteudet ja vesihöyrynpaineet eri paikkakunnilla on annettu taulukoissa 5.12., 5.13. ja 5.14. Laskelmissa on sisäilman lämpötilana käytetty 20 °C ja kosteuslisänä ulkoilman kosteuteen nähden 3 g/m³.

Taulukko 5.11. Seinärakenteiden läpi diffuusiolla siirtyneen kosteuden määrä vuoden eri kuukausina.

| Kuukausi | Kevytbetoniseinä ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | Tiilirunkoinen seinä ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | Betonisandwich ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) |
|----------|---|---|---|
| I | 8,3 | 2,6 | 0,6 |
| II | 8,5 | 2,7 | 0,6 |
| III | 8,7 | 2,8 | 0,6 |
| IV | 10,6 | 3,4 | 0,8 |
| V | 10,4 | 3,3 | 0,8 |
| VI | 9,2 | 2,9 | 0,7 |
| VII | 11,9 | 3,8 | 0,9 |
| VIII | 11,9 | 3,8 | 0,9 |
| IX | 11,3 | 3,6 | 0,8 |
| X | 9,8 | 3,1 | 0,7 |
| XI | 10,3 | 3,3 | 0,7 |
| XII | 9,0 | 2,9 | 0,7 |

Taulukko 5.12. Lämpötilan kuukausikeskiarvoja (°C) vuosilta 1931 - 1960 /34/.

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|--------------|-------|-------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Helsinki | -6.1 | -6.6 | -3.5 | 2.6 | 8.9 | 14.0 | 17.2 | 16.0 | 11.1 | 5.4 | 1.0 | -2.6 |
| Turku | -6.0 | -6.6 | -3.6 | 2.2 | 8.7 | 13.9 | 17.1 | 15.7 | 10.6 | 5.2 | 0.9 | -2.7 |
| Lappeenranta | -8.6 | -8.6 | -4.5 | 2.5 | 9.4 | 15.0 | 17.8 | 16.1 | 10.6 | 4.3 | -0.7 | -5.0 |
| Tampere | -7.9 | -8.0 | -4.8 | 2.2 | 8.8 | 13.7 | 16.8 | 15.0 | 10.0 | 4.3 | -0.1 | -3.9 |
| Jyväskylä | -8.8 | -8.7 | -4.8 | 2.0 | 8.7 | 13.9 | 16.9 | 15.0 | 9.8 | 3.8 | -0.8 | -5.0 |
| Vaasa | -6.7 | -6.9 | -4.2 | 1.5 | 7.6 | 13.0 | 16.5 | 15.0 | 10.1 | 4.4 | -0.1 | -3.3 |
| Kajaani | -10.6 | -10.6 | -6.7 | 0.4 | 6.9 | 13.0 | 16.1 | 14.0 | 8.3 | 2.1 | -2.6 | -7.0 |
| Sodankylä | -13.5 | -13.0 | -8.9 | -2.2 | 4.8 | 11.3 | 14.7 | 12.0 | 6.2 | -0.5 | -5.8 | -9.8 |

Taulukko 5.13.

Ilman keskimääräiset suhteelliset kosteudet (%) 1961 - 1975 /32/.

| Paikkakunta | Kuukausi | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Helsinki-Vantaa (lentoasema) | 88 | 87 | 82 | 76 | 66 | 64 | 71 | 78 | 84 | 86 | 89 | 89 |
| Jokioinen | 89 | 88 | 82 | 77 | 68 | 66 | 73 | 80 | 86 | 89 | 91 | 90 |
| Turku | 89 | 88 | 82 | 76 | 67 | 65 | 71 | 77 | 84 | 87 | 90 | 90 |
| Lappeenranta | 88 | 86 | 81 | 75 | 65 | 64 | 70 | 77 | 84 | 87 | 91 | 90 |
| Jyväskylä | 89 | 87 | 81 | 75 | 68 | 65 | 72 | 80 | 86 | 88 | 91 | 90 |
| Vaasa | 88 | 87 | 83 | 78 | 69 | 67 | 72 | 79 | 84 | 87 | 89 | 89 |
| Kajaani | 86 | 85 | 81 | 75 | 67 | 66 | 69 | 78 | 84 | 87 | 90 | 88 |
| Sodankylä | 85 | 83 | 80 | 73 | 67 | 65 | 69 | 78 | 84 | 88 | 89 | 89 |

Taulukko 5.14.

Ilman keskimääräiset vesihöyrynpaineet (Pa) 1961 - 1975 /32/.

| Paikkakunta | Kuukausi | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Helsinki-Vantaa (lentoasema) | 370 | 360 | 420 | 550 | 780 | 1 090 | 1 340 | 1 340 | 1 080 | 800 | 580 | 440 |
| Jokioinen | 370 | 360 | 400 | 550 | 770 | 1 070 | 1 300 | 1 300 | 1 050 | 780 | 560 | 440 |
| Turku | 400 | 380 | 430 | 560 | 780 | 1 080 | 1 320 | 1 320 | 1 080 | 820 | 590 | 470 |
| Lappeenranta | 320 | 320 | 390 | 530 | 760 | 1 070 | 1 310 | 1 300 | 1 040 | 750 | 540 | 400 |
| Jyväskylä | 320 | 310 | 370 | 500 | 740 | 1 050 | 1 260 | 1 260 | 980 | 720 | 510 | 380 |
| Vaasa | 370 | 340 | 400 | 530 | 720 | 1 040 | 1 270 | 1 270 | 1 000 | 750 | 540 | 420 |
| Kajaani | 270 | 260 | 330 | 460 | 670 | 1 000 | 1 220 | 1 210 | 920 | 660 | 460 | 340 |
| Sodankylä | 230 | 220 | 280 | 390 | 560 | 870 | 1 090 | 1 060 | 560 | 560 | 380 | 270 |

Sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron vaikutuksesta rakenteiden läpi konvektiolla siirtyvät kosteusmäärät ovat ehjässä rakenteessa diffuusion kuljettamia vesimääriä pienempiä. Seinärakenteissa mahdollisesti olevien reikien ja rakojen kautta kulkeutuvat kosteusmäärät ovat kuitenkin diffuusiokosteuteen nähden moninkertaisia. Esimerkkinä tarkastellaan kevytbetonirakennetta. Lähteen /38/ mukaan kevytbetonirakenteen läpi ilmavuotojen mukana siirtyvät kosteusmäärät eri tapauksissa ovat seuraavat:

- Homogeeninen kevytbetoni 2.5 x 10⁻⁸ kg/m²s
- Ladottu (ei muurattu) kevytbetoni harkkorakenne 406 x 10⁻⁸ kg/m²s
- 50 cm leveät kevytbetonielementit, elementtien välissä halkeamat
 - 0,2 mm 11 x 10⁻⁸ kg/m²s
 - 1 mm 920 x 10⁻⁸ kg/m²s

Korjattava julkisivurakenne saattaa korjausvaiheessa olla esim. sateen jäljiltä märkä. Vanhan seinärakenteen kuivuessa tuuletusrakoon siirtyvää kosteutta voidaan karkeasti arvioida kaavan 3.35. avulla, kun oletetaan kaiken materiaalin sisältävän vesimäärän sijaitsevan ulkokuoren keskikohdassa ja lasketaan rakenteen diffuusiiovastus ja kosteusvirta kuoren keskikohdasta mineraalivillan ja tuulensuojalevyn läpi tuuletusrakoon.

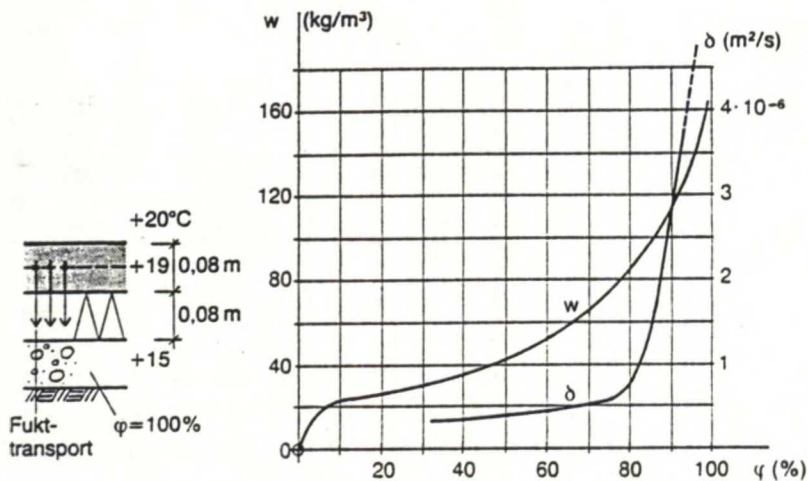
Taulukossa 5.15. on esitetty arvio 40 mm paksusta betonikuoresta tuuletusrakoon tulevasta kosteusvirrasta, kun betoni kuivuu vain tuuletusrakoon päin kosteuspitoisuudesta 90 % tasapainokosteuteen. Käytetään tuuletusraon lämpötilana 5 °C ja suhteellisena kosteutena 80 %

sekä lisälämmöneristetyin betonikuoren lämpötilana 15 °C koko laskenta-aikana, jolloin betonin kosteuspitoisuus tasapainotilassa on n. 40 %. Betonin vesihöyrynläpäisevyys riippuu sen kosteuspitoisuudesta kuvan 5.15. mukaisesti.

Taulukko 5.15.

40 mm paksun betonikuoren kuivumisesta 90 % - 40 % tuuletusrakoon aiheutuneet keskimääräiset kosteusvirrat ja tarvittavat kuivumisajat.

| Betonin kosteuspitoisuuden muutos (%) | 90 - 80 | 80 - 70 | 70 - 60 | 60 - 50 | 50 - 40 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Kosteusvirta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 25 | 10 | 6 | 3 | 1 |
| Aika (vrk) | 50 | 90 | 110 | 160 | 480 |



Kuva 5.15. Betonin sorptiokäyrä ja vesihöyrynläpäisevyys betonin kosteuspitoisuuden funktiona betonin kuivussa /13/.

Lisäksi rakenteeseen voi päästä kosteutta ulkoilman sadevesivuotojen seurauksena huonosti suunniteltujen rakenneyksityiskohtien vuoksi. Kosteusmäärät voivat joissain tapauksissa olla huomattavia, mutta niiden laskennallinen määrittäminen on hyvin vaikeaa.

Tuuletusraon tehtävänä on poistaa rakenteesta kosteutta. Kuvassa 5.14. esitettyjen tuuletusrakomallien maksimaaliset kosteudenpoistokyvyt eri kuukausina on esitetty taulukossa 5.16. Tuuletusraon kosteudenpoistokyky on laskettu kaavalla 3.41. Virtausnopeudet raoissa on laskettu RAKO-tietokoneohjelmalla käyttäen ulkolämpötiloina taulukossa 5.12. ja tuulen nopeuksina taulukossa 3.1. annettuja Jyväskylän kuukausikeskiarvoja. Tuuletusrakoon tulevan ilman kosteuspitoisuudeksi on oletettu ulkoilman vesimäärä ja poistuvan ilman kosteuspitoisuudeksi ulkoilman lämpötilaa vastaavan kyllästystilan ilman vesihöyrymäärä.

Taulukko 5.16.

Tuuletusraon kosteudenpoistokyky tuuletusraon paksuudella 20 mm ja pituuksilla 1,5 m, 2,8 m ja 8,4 m, kun tarkastelu tehdään Jyväskylän ilmasto-oloissa vallitsevien kuukausikeskiarvojen mukaisesti.

| Kuukausi | Tuuletusrako l = 1,5 m (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | Tuuletusrako l = 2,8 m (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | Tuuletusrako l = 8,4 m (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) |
|----------|--|--|--|
| I | 43,3 | 21,3 | 4,9 |
| II | 51,6 | 25,4 | 5,9 |
| III | 104,9 | 51,7 | 11,9 |
| IV | 307,9 | 152,9 | 37,6 |
| V | 618,0 | 306,9 | 75,5 |
| VI | 939,1 | 466,4 | 114,8 |
| VII | 697,8 | 338,7 | 76,9 |
| VIII | 443,6 | 215,3 | 48,8 |
| IX | 225,2 | 109,3 | 24,8 |
| X | 164,2 | 81,3 | 19,7 |
| XI | 87,4 | 43,3 | 10,5 |
| XII | 68,2 | 33,8 | 8,2 |

Verrattaessa tuuletusrakojen kosteudenpoistokykyä diffuusiolla ja konvektiolla halkeilemattoman rakenteen läpi siirtyvään kosteusmäärään huomataan, että ainoastaan kevytbetoniseinän ja 8,4 m korkean tuuletusraon tapauksessa rakenteessa tapahtuisi tiivistymistä talvikuukausien aikana. Tiivistyvän veden määrä talvikautena on esitetty taulukossa 5.17.

Taulukko 5.17.

Ehjään seinärakenteeseen diffuusion ja konvektion vaikutuksesta talvikautena tiivistyvä kosteus tapauksessa, jossa tuuletusraon korkeus on 8,4 m ja vanha seinä on 290 mm paksu kevytbetoni-seinä.

| Kuukausi | XI | XII | I | II | III | IV |
|---|------|------|------|------|-------|-------|
| Diffuusiovirta (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | 10,3 | 9,0 | 8,3 | 8,5 | 8,7 | 10,6 |
| Konvektiovirta (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Poistuva kosteusvirta (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | 10,5 | 8,2 | 4,9 | 5,9 | 11,9 | 37,6 |
| Erotus (x 10 ⁻⁸ kg/m ² s) | 2,3 | 3,3 | 5,9 | 5,1 | -0,7 | -24,5 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m ²) | 0,05 | 0,08 | 0,14 | 0,13 | -0,02 | -0,64 |
| Kertymä (kg/m ²) | 0,05 | 0,13 | 0,27 | 0,40 | 0,38 | -0,26 |

Seinärakenteeseen tiivistyvän kosteuden voidaan katsoa olevan haitallista, kun sen määrä ylittää $0,5 \text{ kg/m}^2$. Kevytbetoniseinän ja $8,4 \text{ m}$ korkean tuuletusraon tapauksessa tiivistyvän kosteuden määrä ei siis ole haitallisen suurta, ja tiivistynyt vesi haihtuu rakenteesta kuivumiskaudella huhtikuussa. Käytännössä, kun julkisivun ulkoverhous tehdään avosaumaisena, levysaumoissa tapahtuvat virtaukset parantavat tuuletusraon kosteudenpoistokykyä ja luultavasti edes taulukon 5.17. mukaista tiivistymistä ei pääse tapahtumaan.

Taulukossa 5.18. on esitetty tiivistyvän veden määrä talvikautena tapauksessa, jossa kevytbetonielementtiseinän elementtien väliin on jäänyt $0,2 \text{ mm}$ halkeamat ja tuuletusrako on $8,4 \text{ m}$ korkea.

Taulukko 5.18.

Seinärakenteeseen diffuusion ja konvektiovuotojen vaikutuksesta talvikautena tiivistyvä kosteus tapauksessa, jossa tuuletusraon korkeus on $8,4 \text{ m}$ ja vanha seinä on 290 mm paksu kevytbetoniseinä, jossa 50 cm leveiden elementtien välissä on $0,2 \text{ mm}$ leveät halkeamat.

| Kuukausi | X | XI | XII | I | II | III | IV | V |
|---|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Diffuusiovirta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 9,8 | 10,3 | 9,0 | 8,3 | 8,5 | 8,7 | 10,6 | 10,4 |
| Kosteusvirta halkeamasta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Poistuva kosteusvirta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 19,7 | 10,5 | 8,2 | 4,9 | 5,9 | 11,9 | 37,6 | 75,5 |
| Erotus ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 1,1 | 10,8 | 11,8 | 14,4 | 13,6 | 7,8 | -16,0 | -54,1 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m^2) | 0,03 | 0,28 | 0,31 | 0,37 | 0,35 | 0,20 | -0,41 | -1,40 |
| Kertymä (kg/m^2) | 0,03 | 0,31 | 0,62 | 0,99 | 1,34 | 1,54 | 1,13 | -0,27 |

Nähdään, että talvikautena seinärakenteeseen kertyy maksimissaan $1,54 \text{ kg/m}^2$ vettä, joka katsotaan yleensä haitalliseksi määräksi, ja rakenne kuivuu toukokuun aikana. Jälleen kerran avosaumainen levyrakenne muuttaa tilannetta jonkun verran parempaan suuntaan. Kerroksen korkuisessa tuuletusraossa ei kosteuden tiivistymistä tapahdu tässäkään tapauksessa, mutta halkeamien koon ja määrän kasvaessa tiivistymisvaara suurenee. Sekä kosteusvuotojen että seinän lämpöteknisen toiminnan kannalta korjattavassa seinässä mahdollisesti olevat halkeamat tulee tiivistää ennen korjausrakenteen asentamista.

Taulukossa 5.19. tarkastellaan tapausta, jossa julkisivun korjaus tapahtuu syyskuun lopussa, ja korjattavan betonisandwichseinän ulkokuori on ennen korjausta olleiden rankkojen sateiden ja elementtisaumojen vuotamisen johdosta kastunut 90% suhteelliseen kosteuteen. Tuuletusraon korkeus on $8,4 \text{ m}$. Diffuusiovirtaa ei ole otettu pienenä huomioon.

Taulukko 5.19.

Betonisandwichseinän ulkokuoren (40 mm) kuivumisen aiheuttama kosteuden tiivistyminen tuuletusrakoon, kun tuuletusraon korkeus on 8,4 m.

| Kuukausi | X | XI | XII | I | II | III | IV |
|---|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Betonikuoren kuivumisesta aih. kosteusvirta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 25 | 20 | 10 | 10 | 8 | 3 | 3 |
| Poistuva kosteusvirta ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 19,7 | 10,5 | 8,2 | 4,9 | 5,9 | 11,9 | 37,6 |
| Erotus ($\times 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{s}$) | 5,3 | 9,5 | 1,8 | 5,1 | 2,1 | -8,9 | -34,6 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m^2) | 0,14 | 0,25 | 0,05 | 0,13 | 0,05 | -0,23 | -0,90 |
| Kertymä (kg/m^2) | 0,14 | 0,39 | 0,44 | 0,57 | 0,62 | 0,39 | -0,51 |

Tiivistyvän kosteuden määrä maksimissaan talven aikana on $0,62 \text{ kg/m}^2$. Kosteusrasituksen ollessa kertaluontoinen määrä ei ole kovin suuri, ja syntynyt kosteuskertymä kuivuu jo huhtikuun aikana. Seuraavina talvina ei enää ole odotettavissa kosteuden tiivistymistä rakenteeseen pelkän diffuusiovirran vaikuttaessa.

Viimeisenä tarkasteluna taulukossa 5.20. arvioidaan suurimman sallittavan ulkoa tulevan sadeveden aiheuttaman kosteuden keskiarvoa 8,4 m korkeassa tuuletusraossa edellä esitetyillä pohjarakenteilla, kun lisäksi tuuletusrakoon tulee kosteutta vain diffuusion vaikutuksesta. Suurimpana sallittavana tiivistyvän veden määränä tuuletusraossa pidetään $0,5 \text{ kg/m}^2$.

Taulukon mukaan suurimpia sallittuja kosteusmääriä vastaavat ulkoa tulevat kosteusvirrat ovat:

| | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Kevytbetoniseinälle | $3,0 \times 10^{-8}$ | $\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| Tiiliseinälle | $8,8 \times 10^{-8}$ | $\text{kg/m}^2\text{s}$ |
| Betonisandwichseinälle | $11,1 \times 10^{-8}$ | $\text{kg/m}^2\text{s}$ |

Kyseisiä kosteusvirtoja vastaavat yhdelle vuorokaudelle lasketut tuuletusrakoon kertyvät kosteusmäärät ovat pieniä, kevytbetoniseinälle $2,59 \text{ g/m}^2$, tiiliseinälle $7,60 \text{ g/m}^2$ ja betonisandwich-seinälle $8,64 \text{ g/m}^2$. Tämä kosteusmäärä sallii esim. sateen vaikutuksesta kosteuden imeytymisen levyn takapintoihin levyreunoissa avoimia levysaumoja käytettäessä, mutta varsinaisia sadevesivuotoja ei levyrakenteelle voida sallia.

Taulukko 5.20.

Suurimmat sallittavat ulkoa sadeveden mukana tulevat kosteuskäärät 8,4 m korkean tuuletusraon ja eri taustarakenteiden tapauksessa, kun suurimpana sallittuna kosteuskertymänä rakenteessa pidetään 0,5 kg/m².

| Kuukausi | XI | XII | I | II | III | IV |
|--|------|------|------|------|-------|-------|
| Poistuva kosteus (kg/m ²) | 0,27 | 0,21 | 0,13 | 0,15 | 0,31 | 0,97 |
| Kevytbetoniseinä | | | | | | |
| Diffuusion aih. kosteus (kg/m ²) | 0,27 | 0,23 | 0,22 | 0,22 | 0,23 | 0,27 |
| Ulkoa tuleva kosteus (kg/m ²) | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m ²) | 0,08 | 0,10 | 0,17 | 0,15 | 0,00 | -0,62 |
| Kosteuskertymä (kg/m ²) | 0,08 | 0,18 | 0,35 | 0,50 | 0,50 | -0,12 |
| Tiiliseinä | | | | | | |
| Diffuusion aih. kosteus (kg/m ²) | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,09 |
| Ulkoa tuleva kosteus (kg/m ²) | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m ²) | 0,05 | 0,10 | 0,17 | 0,15 | -0,01 | -0,65 |
| Kosteuskertymä (kg/m ²) | 0,05 | 0,15 | 0,32 | 0,47 | 0,46 | -0,19 |
| Betonisandwichseinä | | | | | | |
| Diffuusion aih. kosteus (kg/m ²) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Ulkoa tuleva kosteus (kg/m ²) | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| Tiivistyvä / haihtuva kosteus (kg/m ²) | 0,04 | 0,10 | 0,18 | 0,16 | 0,00 | -0,66 |
| Kosteuskertymä (kg/m ²) | 0,04 | 0,14 | 0,32 | 0,48 | 0,48 | -0,18 |

Edellä esitettyjen laskelmien paikkaansapitävyyden ehtona on, että rakenteessa oleva tuuletusrako vastaa malleissa käytettyjä tuuletusrakojia. Tuuletusraon paksuuden tulee siis olla vähintään 20 mm ja seinän ylä- ja alaosaan olevien tuuletusreikien koko ja määrä tulee olla riittävä kunnollisen tuuletuksen aikaansaamiseksi. Saksan normeissa annettu sisään- ja ulosvirtausaukkojen minimipoikkileikkaus 50 cm²/m saavutetaan seinän alareunassa esim. valmiilla reikäpellillä, jonka reikämäärä on vähintään 25 %, tai esimerkiksi seuraavilla reikämitoilla:

- ϕ 14 k 30 (= 51,3 cm²/m)
- ϕ 15 k 35 (= 50,5 cm²/m)
- ϕ 16 k 40 (= 50,3 cm²/m)
- ϕ 17 k 45 (= 50,4 cm²/m)

Käytetyissä tuuletusrakomalleissa seinän yläosassa on verhouslevyjen yläpuolelle jätetty 10 mm rako, ja vesipellin ja levyn pinnan väli on myös 10 mm kuvan 5.14. mukaisesti.

5.4. AJAN VAIKUTUKSET RAKENTEEEN OMINAISUUKSIIN

5.4.1. PITKÄAIKAISKESTÄVYYSKOKEET LUONNONOLOISSA

Mastercladin pitkäaikaiskestävyyttä tutkitaan parhaillaan luonnollisissa olosuhteissa erilaisissa sääympäristöissä sijaitsevilla tutkimusasemilla kahdeksassa kohteessa ympäri maailmaa. Tutkitavana ovat kaikki Cape Ltd:n valmistamat julkisivutuotteet. Tutkimuskohteet ja niissä vallinneet ilmasto-olosuhteet ovat seuraavat:

| | |
|---|----------------------------|
| 1. Princes Risborough / Garston, Englanti | normaali ilmasto |
| 2. Portsmouth, Englanti | meri-ilmasto |
| 3. Merlewood, Cumbria, Englanti | hyvin kostea |
| 4. Moor House, Cumbria, Englanti | hyvin kostea, kylmä |
| 5. Innisfail, Australia | kuuma, kostea, trooppinen |
| 6. Cloncurry, Australia | kuuma, kuiva |
| 7. St Gallen, Sveitsi | keskieurooppalainen, kylmä |
| 8. Oslo, Norja | Skandinaavinen, kylmä |

Kylmissä kohteissa säätietojen mukaan lämpötila vaihtelee 0 °C:n ympärillä Sveitsin vuoristo-kohteessa 12 kk ja Norjassa 7 kk aikana vuodessa. Moor Housessa maaperä jäätyy useimpina öinä marraskuusta huhtikuuhun ja lisäksi lumisade on runsasta. Kohteet on valittu siitä syystä, että suurimmat pakkasvauriot syntyvät juuri lämpötilan vaihdellessa jäätymispisteen molemmin puolin. Australian kohteissa päivittäiset maksimilämpötilat ovat 40,5 °C Innisfail:ssa, jossa ilman suhteellinen kosteus on yli 70 %, ja 45,5 °C Cloncurry:ssa, jossa suhteellinen kosteus ja sademäärät ovat pieniä.

Koekappaleet ovat kokonaisesta levystä leikattuja 170 X 170 mm² neliöitä. Kappaleet on kiinnitetty raameihin ja suunnattu neljällä eri tavalla: kaksi levyä pohjoiseen ja kaksi etelään, molempiin suuntiin yksi levy pystysuorassa asennossa ja yksi 45 ° kulmassa. Kustakin tutkittavasta materiaalista on tehty 72 koekappaletta jokaiseen tutkimuskohteeseen. 1, 2, 5, 10 ja 20 vuoden kuluttua tutkitaan kolme koekappaletta jokaisesta suuntausvaihtoehdosta. Tutkimusta varten kappaleet palautetaan Uxbridgeen, jossa ne tutkitaan ensin silmämääräisesti näkyvien vaurioiden varalta, testataan sitten 3-piste taivutuksella täysin vedellä kyllästettynä taivutuslujuuden määrittystä varten ja kuivataan lopuksi materiaalin tiheyden selvittämiseksi. Saatuja tuloksia verrataan tutkimuksen alussa vertailukappaleilla saatuihin tuloksiin. Mastercladin osalta koe alkoi vuonna 1985. Tällä hetkellä tutkimustuloksia on saatu viiden vuoden ajalta. Tutkimustulokset ovat liitteenä nro 3. Liitteen taulukossa olevat englanninkieliset suureet ovat seuraavat:

Young's Modulus = kimmokerroin
 Proof Stress = myötökuorma
 Modulus of Rupture = taivutuslujuus
 Specific Work = murtoenergia
 Failure Strain = murtovenymä
 Density = tiheys

Tulosten perusteella voidaan todeta, ettei missään kohteessa ole tähän mennessä tapahtunut merkittävää lujuuden alenemista. Näkyvää vaurioitumista ei tavattu muutoin kuin pinnan pehmenemisenä joillakin 45 ° kulmassa olleista kappaleista. Arvioitaessa levyn pitkäaikaiskestävyyttä Suomen oloissa voidaan tarkastella lähinnä Norjan ja Sveitsin kohteiden tuloksia. Niissä ei ole havaittu merkittävää vaurioitumista, mutta koe on vasta alussa ja tulevina vuosina saatavat koetulokset antavat selvemmän kuvan materiaalin pitkäaikaiskestävyydestä.

5.4.2. PAKKASENKESTÄVYYS

Mastercladin pakkasenkestävyyttä on tutkittu laboratorio-olosuhteissa Englannissa Cape R & D -laboratoriossa. Jäädytys-sulatuskokeella tutkittiin materiaalin pakkasenkestävyyttä mittamalla jaksottaisen jäädytyn ja sulatuksen vaikutuksia tuotteen ominaisuuksiin. 150 X 25 mm² kaistaleet, jotka oli leikattu vahvempaan suuntaan kokonaisesta levystä, tiivistettiin polyeteeniin täysin vedellä kyllästettyinä ja laitettiin jäädytys-sulatuslaitteeseen. Lämpötilavaihtelu tapahtui -20 °C:n ja +20°C:n välillä käyttäen 6 tunnin automaattisykliä. Koekappaleet irrotettiin ja rikottiin 3-piste taivutuksella 100:n, 200:n ja 500:n jäädytys-sulatusjakson jälkeen. Saatuja taivutuslujuuden arvoja verrattiin koestamattomilla vertailukappaleilla saatuihin arvoihin. Yleensä jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuva ominaisuuksien huononeminen on väistämätöntä sekä taivutuslujuuden että kimmokertoimen osalta, kun tarkastellaan kerroksellisia materiaaleja. Tämä johtuu siitä, että materiaali alkaa jakautua lamelleihin. Jäädytys-sulatuskokeen tulokset ovat taulukossa 5.21.

Taulukko 5.21.

Englannissa Cape R & D -laboratoriossa tehdyn jäädytys-sulatuskokeen tulokset.

F/T CYCLING OF MASTERCLAD

| PRODUCT | No. of CYCLES | YOUNGS MOD. GPa | PROOF STRESS MPa | M.o.R. MPa | SPECIFIC WORK KJ/m ² | FAILURE STRAIN % | DENSITY Kg/m ³ |
|------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Masterclad | 0 | 10.70 | 13.80 | 18.50 | 5.40 | .41 | 1558 |
| Masterclad | 100 | 9.60 | 13.80 | 20.20 | 7.10 | .49 | 1569 |
| Masterclad | 200 | 9.90 | 14.20 | 21.50 | 6.40 | .46 | 1542 |
| Masterclad | 500 | 9.40 | 13.30 | 20.90 | 5.20 | .46 | 1511 |
| Masterclad | 0 | 13.20 | 18.50 | 23.40 | 5.50 | .35 | 1492 |
| Masterclad | 100 | 10.30 | 16.10 | 23.00 | 5.40 | .39 | 1500 |
| Masterclad | 200 | 10.10 | 15.30 | 22.50 | 5.90 | .42 | 1479 |
| Masterclad | 500 | 9.10 | 13.60 | 20.20 | 4.90 | .40 | 1464 |
| Masterclad | 0 | 11.40 | 18.00 | 23.70 | 4.70 | .34 | 1490 |
| Masterclad | 100 | 10.60 | 17.50 | 26.20 | 7.10 | .45 | 1495 |
| Masterclad | 200 | 11.10 | 16.60 | 26.20 | 6.80 | .42 | 1487 |
| Masterclad | 500 | 11.10 | 17.10 | 26.20 | 6.70 | .42 | 1481 |

Kokeen aikana ei koekappaleihin syntynyt näkyviä vaurioita. Pääosa koekappaleista säilytti lujuutensa 500:n jäädytys-sulatusjakson jälkeen, mutta yhdessä sarjassa näkyi jonkun verran alenemista lujuudessa ja materiaalin kovuudessa. Koetta voidaan pitää suhteellisen ankarana, sillä kokeen aikana kappaleet olivat täysin vedellä kyllästettyjä. Tätä harvoin tapahtuu todellisesti rakenteessa julkisivulevyn ollessa pystysuorassa asennossa. CEN-standardi kuitusementtilevyille sisältää samanlaisen jäädytys-sulatuskokeen kuin tämä, mutta vaadittu jakso määrä on vain 100 jaksoa. Kokeen ankaruudesta johtuen ei voida arvioida sen vastaavuutta luonnonoloissa tapahtuvaan vanhenemiseen. Jatkossa se saattaa olla mahdollista, kun luonnonkohteissa tapahtuvan kokeen tuloksia saadaan pidemmältä aikaväliltä. Kuitenkin voidaan jo sanoa, että 100 jaksoa jäädytys-sulatuskokeessa vastaa vähintään viittä vuotta ankarissa luonnonolosuhteissa.

5.4.3. KESTÄVYYS KOSTEUSVAIHTELUJEN ALAISENA

Mastercladin kastumis-kuivumiskoe toteutettiin myös Englannissa Cape R & D -laboratoriossa samanlaisilla koekappaleilla kuin jäädytys-sulatuskokein. Koekappaleet asetettiin metallitarjottimille automaattiseen kuivatusuuniin. Tarjottimet täytettiin vedellä tunnin ajaksi, jolloin koekappaleet imivät vettä. Sen jälkeen tarjottimet tyhjennettiin ja kappaleita kuivattiin 60 °C:ssa viisi tuntia. Jakso valittiin niin, että kappaleiden kosteuspitoisuus vaihteli 10 - 80 %:iin täysin vedellä kyllästetystä tilasta, kuten Englannissa normaalioloissa tapahtuu. Koe jatkui 100, 200, 500 ja 1000 jaksoa, jonka jälkeen koekappaleet rikottiin 3 pisteen taivutuksella vedellä kyllästettyinä. Kastumis-kuivumiskokeen tulokset ovat taulukossa 5.22.

S/D CYCLING OF MASTERCLAD

| PRODUCT | No. of CYCLES | YOUNG'S MOD. GPa | PROOF STRESS MPa | M.O.R. MPa | SPECIFIC WORK KJ/m ² | FAILURE STRAIN % | DENSITY Kg/m ³ |
|------------|---------------|------------------|------------------|------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
| Masterclad | 0 | 10.70 | 13.80 | 18.50 | 5.37 | .41 | 1558 |
| Masterclad | 100 | 15.30 | 20.30 | 24.10 | 2.80 | .24 | 1594 |
| Masterclad | 200 | 15.00 | 21.20 | 26.20 | 3.06 | .26 | 1611 |
| Masterclad | 500 | 12.90 | 19.50 | 25.30 | 3.53 | .29 | 1568 |
| Masterclad | 1000 | 10.10 | 17.30 | 22.20 | 3.55 | .33 | 1587 |
| Masterclad | 0 | 13.10 | 18.00 | 25.50 | 3.50 | .35 | 1494 |
| Masterclad | 100 | 15.30 | 21.60 | 27.60 | 3.70 | .27 | 1525 |
| Masterclad | 200 | 14.00 | 20.70 | 26.70 | 3.80 | .29 | 1510 |
| Masterclad | 500 | 11.10 | 17.70 | 23.50 | 3.40 | .31 | 1507 |
| Masterclad | 1000 | 7.60 | 14.70 | 20.00 | 3.98 | .40 | 1491 |

Taulukko 5.22.

Englannissa Cape R & D -laboratoriossa tehdyn kastumis-kuivumiskokeen tulokset.

Materiaalin ominaisuuksien muutokset olivat suhteellisen pieniä siten, että 1000:n jakson jälkeen voitiin havaita jonkinasteista haurastumista. Useilla kuitusementtimateriaaleilla eri yhteyksissä tehdyistä kokeista voidaan arvioida, että yhden vuoden luonnollinen vanheneminen vastaa 100-200 jaksoa kastumis-kuivumiskokeessa riippuen materiaalista ja sääolosuhteista.

5.4.4. ULKONÄÖN PYSYVYYS JA HUOLLETTAVUUS

Masterclad-levyn pinta on erittäin sileä ja tasainen johtuen valmistusmenetelmästä, joten sen pinnoittaminen on helppoa. Värin tasaisuus, pysyvyys ja puhdistettavuus riippuu pinnoitusmenetelmästä ja likaantuvuus pinnoituksen karkeudesta. Pinnoittamaton levy voidaan pestä painepesurilla ja miedolla pesuaineella. Levy voidaan tarvittaessa esim. ilkvallan jäljiltä maalata uudestaan. Pinnoittamaton levy voidaan suhteellisen helposti vaihtaa, mutta pinnoitetussa pinnassa levynvaihdon yhteydessä voi tulla ongelmia värieröjen kanssa, ellei sitten koko pintaa maalata uudelleen.

Masterstone-levyn kivirouhepinta on karkea ja vaaleat värit likaantuvat nopeammin kuin Masterclad:n tai Chromaclad:n tapauksessa. Pinta voidaan kuitenkin pestä painepesurilla ja miedolla pesuaineella. Värien pysyvyys on luonnonkivipinnan ansiosta hyvä. Levyjen uusiminen tarvittaessa on helppoa varsinkin ruuvi kiinnitystä käytettäessä, tosin värieröä vanhoihin levyihin verrattuna tulee luultavasti esiintymään käytetyn luonnonkivirouheen väri vaihtelujen vuoksi.

Chromaclad:in pinnoituksen värien pysyvyyttä on tutkittu Englannissa standardin BS 3900 (osa F3: 1979) mukaisesti. Kokeessa värien pysyvyys todettiin hyväksi ja kokeen perusteella Chromacladin arvioidaan tulevan uudelleenmaalattavaksi n. 15 vuoden käytön jälkeen. Pinnan naarmuuntumisenkestävyyttä tutkittiin standardin BS 3900 (osa E2: 1979) mukaan ja pinnan naarmuuntumisenkestävyydeksi saatiin > 2 kg.

Käytettäessä Chromaclad:ia maantasolla saattaa ilkvallan tai muiden kolhujen seurauksena levyjen reunasta maalipinta lohjeta. Levyt voidaan tarvittaessa paikkamaalata valmistajalta saatavalla paikkamaalilla. Paikkamaalaus ja n. 15 vuotta vanhojen levyjen uusintamaalaus tehdään maaleilla, jotka ovat yhteensopivia muoviakryylimaalien kanssa. Maalauksessa voidaan käyttää ruiskua tai sivellintä maalattavan pinnan koosta riippuen. Likaantuvuus vastaa muiden samantyyppisten julkisivulevyjen likaantumista. Vaaleissa väreissä tulee suunnitelmissa varmistaa, ettei ylempänä olevat värjäävät materiaalit likaa verhoukslevyjä veden mahdollisesti valuessa levyjen pinnalle. Levyt voidaan pestä painepesurilla tai nailonharjalla laimeata pesuainetta käyttäen.

5.4.5. BIOLOGINEN KESTÄVYYS

Mastercladia on tutkittu standardin EN 117 ja BS 6239: 1982 mukaisella kokeella, joka arvioi rakennuslevyjen vastustuskykyä termiittien (*Reticulitermes santonensis*) hyökkäystä vastaan. Kokeen suoritti vuonna 1985 Englannissa Building Research Advisory Service. Kokeessa todettiin, että mastercladin vastustuskyky käytettyjä termiittejä vastaan oli täydellinen. Kahdeksan viikkoa kestäneen kokeen jälkeen kaikki termiitit, joita oli koekappaletta kohden 250 kpl, olivat kuolleet nälkään, eivätkä mikroskooppikuvaukset osoittaneet levyissä minkäänlaisia vaurioita. Testimenetelmän ja käytetyn termiittilajin katsotaan osoittavan levyn käyttäytymisen ankan termiittihyökkäyksen alaisena. Kuitenkin kokeen tulokset ovat vain suuntaa antavia, koska levyä käytetään hyvin monissa luonnonolosuhteissa monien erilaisten termiittilajien esiintymisalueilla.

Levyjen pinnan orgaanisen kasvuston kehittyminen vastaa muiden samantyyppisten kuitusementtilevyjen pinnassa tapahtuvaa kasvua, joka voi aiheuttaa levyn pinnoittamattomien osien likaantumista, mutta ei turmele levyä muulla tavoin. Tuuletusraossa esiintyvän kosteuden

vuoksi puukoolausten lahovaara on olemassa. Puukoolauksissa tulee käyttää kuivattua paine-
kyllästettyä puuta.

5.5. PALOTURVALLISUUS

Mastercladin ja Chromacladin paloteknisen arvioinnin on Englannissa suorittanut The Loss Prevention Council ja Suomessa Mastercladin osalta VTT. Suoritetut materiaalin palamattomuuskokeet olivat lähes samanlaiset ja noudattivat Englannissa standardia BS 476: osa 11: 1982 ja Suomessa vastaavaa standardia SFS-ISO 1182:E.

VTT:n tutkimuselostuksen numero on PAL2311/92. Kokeissa Mastercladin ja Chromacladin todettiin täyttävän palamattomalle rakennustarvikkeelle asetetut vaatimukset.

Levyt kuuluvat siis paloluokkaan A. Pinnan syttymisherkyys- ja palonlevittämislukka on 1/1. Levyt eivät lisää palokuormaa tulipalon aikana eivätkä savua tai eritä myrkyllisiä kaasuja. Lisäeristeenä käytettävä mineraalivilla on myös palamatonta, mutta koolauksissa oleva puu on palava materiaali. Suomessa puuta on käytetty koolausmateriaalina yleensä enintään 8-kerroksisissa rakennuksissa. Kokonaisuudessaan Masterclad-levyillä toteutettu korjausrakenne täyttää Suomessa julkisivurakenteilta vaaditut palonkestovaatimukset, jotka on esitetty luvussa 4.8.

Palotilanteessa suurimman vaaran aiheuttaa levyjen takana oleva tuuletusrako, jolla on varsinkin korkeissa rakennuksissa paloa edistävä vaikutus. Suomessa ei ole erityisiä määräyksiä palokatkojen tekemisestä tuuletettuun rakenteeseen, mutta esimerkiksi Englannissa korkeissa kerrostaloissa kerrosten väliin sekä tietyin välein vaakasuunnassa tehdään palokatko, joka tulipalon sattuessa estää tulen leviämisen tuuletusraon välityksellä. Pystysuuntaisena palokatkona toimii reikäpelti, joka on pinnoitettu kuumuuden vaikutuksesta paisuvalla pinnoitteella. Normaalitylanteessa tuuletus raossa tapahtuu reikäpellissä olevien reikien välityksellä. Tosin pelti muodostaa tuuletusrakoon huomattavan supistuman, joka vähentää raon virtauksia ja huonontaa siten rakenteen kosteudenpoistokykyä. Vaakasuuntaan palokatkoksi asennetaan vanhan seinän ja julkisivulevyn välisen tilan täyttävä palamaton lämmöneristekaistale.

5.6. PÄÄTELMÄT KELPOISUUDESTA

British Board of Agrément on myöntänyt Mastercladille sertifikaatin no. 87/1943 sekä Chromacladille sertifikaatin no. 87/1944 koskien levyjen käyttöä Isossa Britanniassa ulkotiloissa. Sertifikaateissa arvioidaan levyjen eliniän normaaliolosuhteissa ylittävän 30 vuotta, kun noudatetaan edellä annettuja asennus- ja käsittelyohjeita. Masterstonen osalta ei ole olemassa englantilaista sertifikaattia, koska tuote pinnoitetaan Suomessa eikä sitä ole Englannissa saatavana.

Edellä esitettyjen tutkimusten ja tehtyjen laskelmien perusteella saumallisen levykorjausmenetelmän kelpoisuus Suomen oloissa Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-levyjä käytettäessä on hyvä. Levyjen materiaalikäyttäytyminen vastaa lähinnä muiden kuitusementtilevyjen sekä asbestisementtilevyn käyttäytymistä sekä mekaanisilta että muilta ominaisuuksiltaan. Korjausrakenteen suunnittelussa erityistä huomiota tulee kiinnittää levyjen kiinnitysratkaisun ja liittymädetaljiin sateenpitävyyteen, sekä tuuletusraon toiminnan varmistamiseen kosteuden poistamiseksi rakenteesta. Luvussa 9.2. on esitetty esimerkkirakenne, jossa on otettu

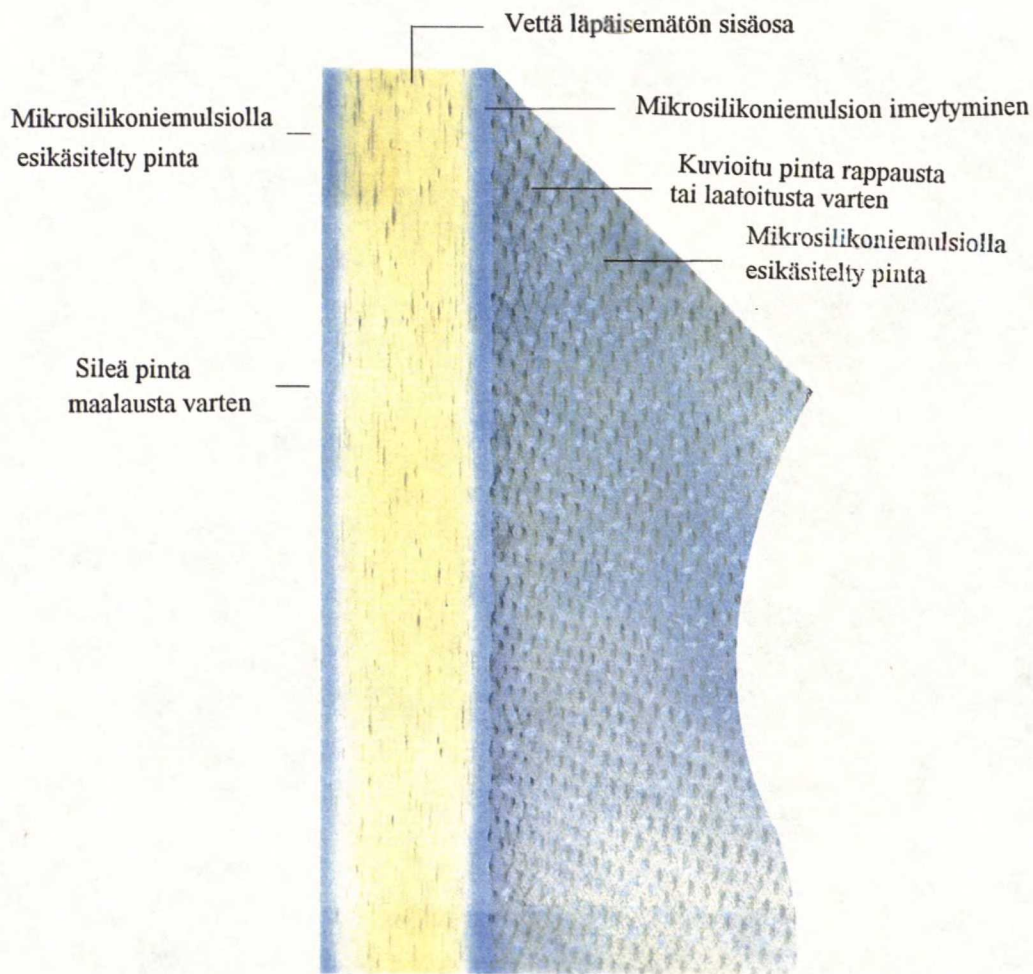
huomioon tässä työssä esille tulleet menetelmän kehittämistarpeet ja joka täyttää julkisivun-
korjausmenetelmän kelpoisuusvaatimukset Suomessa.

6. SAUMATTOMAN LEVYKORJAUSMENETELMÄN KELPOISUUS RAPATTUJA BLUCLAD-JULKISIVULEVYJÄ KÄYTTÄEN

6.1. MENETELMÄN KUVAUS

6.1.1. LEVYTIEDOT

BluClad-julkisivulevyt valmistetaan Englannissa ja valmistajana on Cape Boards Ltd, kuten Masterclad:lla, Masterstonella ja Chromaclad:llakin. Levymateriaalina on kalsiumsilikaatti sekä havupuuselluloosa. Masterclad:iin verrattuna BluClad:in rakenne on pehmeämpi eikä se sisällä epäorgaanisia kuituja. Levy valmistetaan samalla menetelmällä kuin Masterclad. Lisäksi levy on molemmilta puoliltaan esikäsitelty vettäyhkyllä mikrosilikoniemulsiolla, joka antaa levyn pinnalle sinisen sävyn.



Kuva 6.1. BluClad-levyn rakenne /3/.

BluClad-levyä käytetään julkisivuissa ainoastaan pinnoitettuna. Pinnoitteena voidaan käyttää ohutrappausa, maalausta, epoksihartsilla kiinnitettävää kivirouhetta tai laatoitusta. Levypinnat ovat keskenään erilaisia. Toinen puoli on sileä maalausta varten ja toinen puoli on pintakuvioitu karheaksi paremman tartunnan aikaansaamiseksi rapattaessa tai laatoitettaessa. Pinnoitus tapahtuu työmaalla ilman pohjustuskäsittelyä, sillä mikrosilikonikerros toimii pohjustuksena. Mikrosilikonialusta on yhteensopiva useimpien rappaus-, maalien ja laatoitusmassojen kanssa. Levyn tiheys ja levymitat ovat seuraavat:

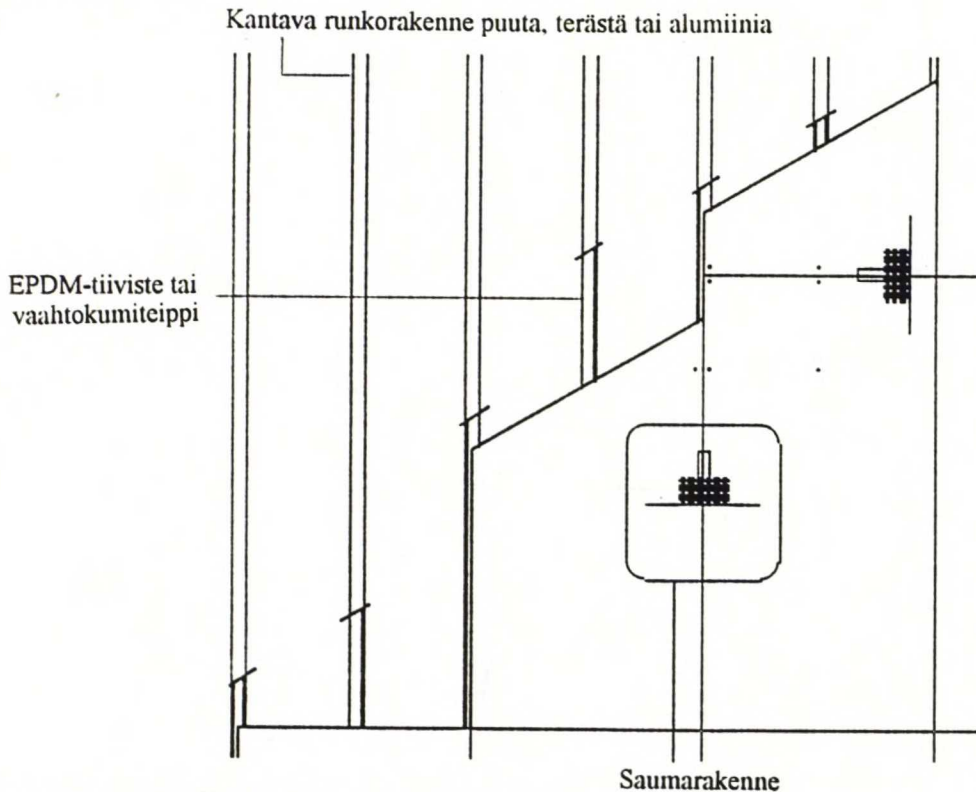
| | | | |
|---------|----------|------------|-------------------|
| Tiheys: | | 1100 | kg/m ³ |
| Mitat: | leveydet | 1220, 1225 | mm |
| | pituudet | 2440, 2500 | mm |
| | paksuus | 10 | mm |

BluClad-levyä voidaan sahata, ruuvata ja naulata kuten puumateriaalia. Rappauspinnan alle jäävien levyreunojen tapauksessa levy voidaan katkaista taittamalla viiltojälkeä pitkin suoraa kulmaa vasten. Kuviosahaus tehdään pisto- tai reikäsahalla. Koneellisessa sahauksessa käytetään volframikarbidi- tai timanttiterää. Porauksessa käytetään kivityöterää tai vastaavaa. Katkaistut levyreunat voi tarvittaessa tasoittaa hiekkapaperilla, raspilla tai viilalla.

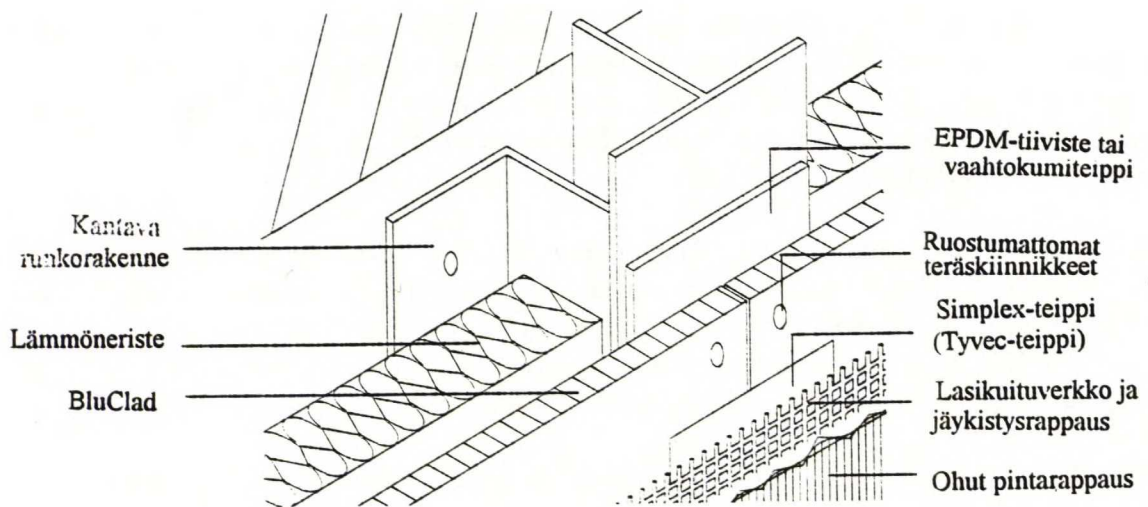
BluClad-levyt varastoidaan vaakasuunnassa tasaisella alustalla siten, että alustuet sijoitetaan leveyssuuntaan ja ne sijaitsevat vähintään metrin välein. Ulkotiloissa levyt varastoidaan peitetynä. Levymateriaali ei sisällä asbestia tai muita epäorgaanisia kuituja, joten niiden käsittelyssä ei tarvita erityisiä varotoimia. Käytettäessä koneellista sahausta tai hiomakonetta suljetussa tilassa suositellaan pölynpoiston järjestämistä kohdeimurilla.

6.1.2. RAKENNERATKAISUT JA DETALJIT

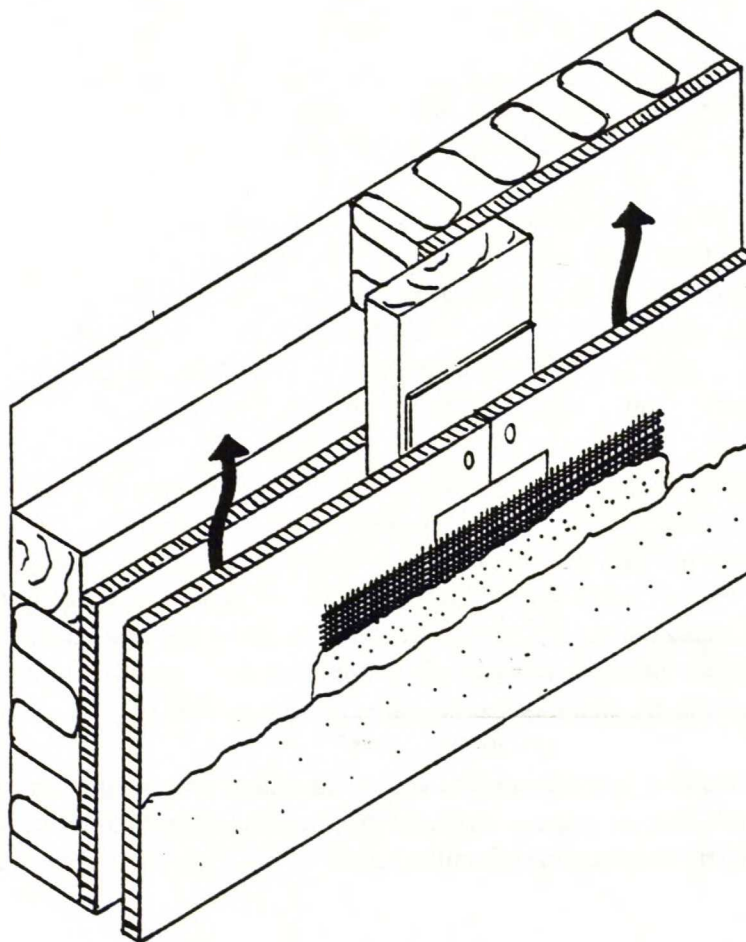
BluClad-julkisivurakenne perustuu kahden ominaisuuden, tuuletetun levyrakenteen ja yhtenäisen saumattoman pinnan yhdistämiseen. Pinnoitus tapahtuu työmaalla ja lopputuloksena saadaan yhtenäinen saumaton pinta. Tässä yhteydessä ei tarkemmin käsitellä levyn muita pinnoitusvaihtoehtoja, vaan tarkastellaan saumattomaksi rapattavaa rakennetta. Levyyn kehitetty rappausysteemi on Englannissa nimeltään BluClad Simplex Facade System. BluClad-julkisivun levyrakenteen kiinnitys tukirankaan on esitetty kuvassa 6.2. Englantilaisessa asennusohjeessa annettu rakenneratkaisu metallista tukirankaa käyttäen näkyy kuvassa 6.3., ja siitä sovellettu rakenneratkaisu puiselle tukirangalle kuvassa 6.4.



Kuva 6.2. BluClad-julkisivulevyjen asentaminen.



Kuva 6.3. Saumattomaksi rapatun BluClad-julkisivun rakenneratkaisu metallista tukirankaa käytettäessä.



Kuva 6.4. Saumattomaksi rapatun BluClad-julkisivun rakenneratkaisu puista tukirankaa käytettäessä.

BluClad-julkisivulevy rakenne toteutetaan tuuletettuna siten, että levyn taakse jää 20 mm tuuletusväli.

Levyt kiinnitetään pystytukirankaan, joka voi olla puuta tai metallia. Pystytuet sijaitsevat levyjen reunoissa ja keskellä. Tukirangan ja levyn takapinnan väliin kiinnitetään EPDM-tiiviste tai vahtokumiteippi, joka varsinkin metallitukien osalta tasoittaa levyjen ja rangan välisiä lämpö- ja kosteusliikeeroja. Vanhan seinän ja BluClad-levyjen väliin jäävä lisäeristysrakenne ei eroa muista levykorjausmenetelmistä.

Levyt kiinnitetään puukoolaukseen ilman esiporausta ruostumattomilla nautoilla, joiden kanta on vähintään 5,5 mm, tai uppokantaruuveilla. Paneelinaulat tai painakupinaulat eivät käy kiinnitykseen. Metallikoolausta varten levyt esiporataan ja kiinnitetään ruostumattomilla teräsruuveilla. Kiinnityksen minimietäisyys levyn reunasta on 12 mm. Maksimikiinnitysvälit ruuveilla ja nautoilla eri tuulenpaineilla sekä pystytukien maksimivälit on annettu taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1.

BluClad-levyjen minimikiinnitysetäisyydet sekä pystytukien minimivälit.

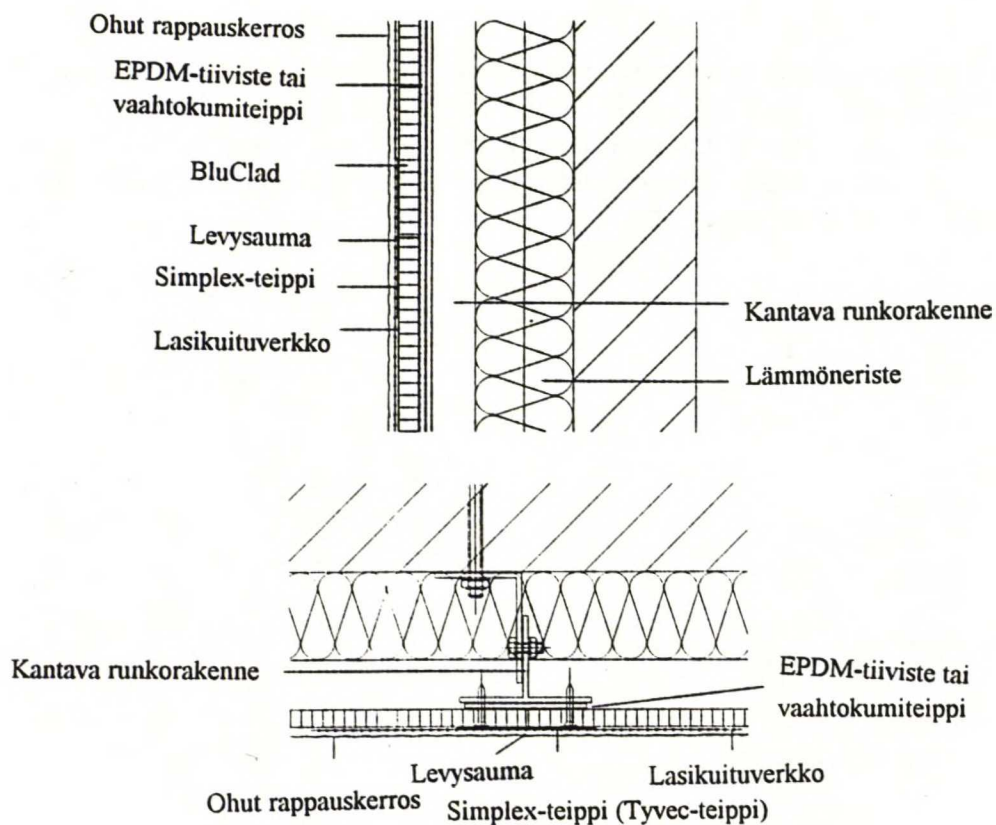
| Kiinnike | Tuulikuorma (kN/m ²) | Tukiväli* (mm) | Kiinnitysväli (mm) |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Uppokantaruuvi | 0 - 1,5 | 600 | 400 |
| | 1,5 - 2,0 | 600 | 300 |
| Naula, kanta > 5,5 mm | 0 - 1,5 | 600 | 150 |

* Rakennusten pohjakerroksissa sekä muissa paikoissa, joissa julkisivurakenteelta vaaditaan hyvää iskunkestävyyttä, tukivälejä pienennetään annetusta arvosta.

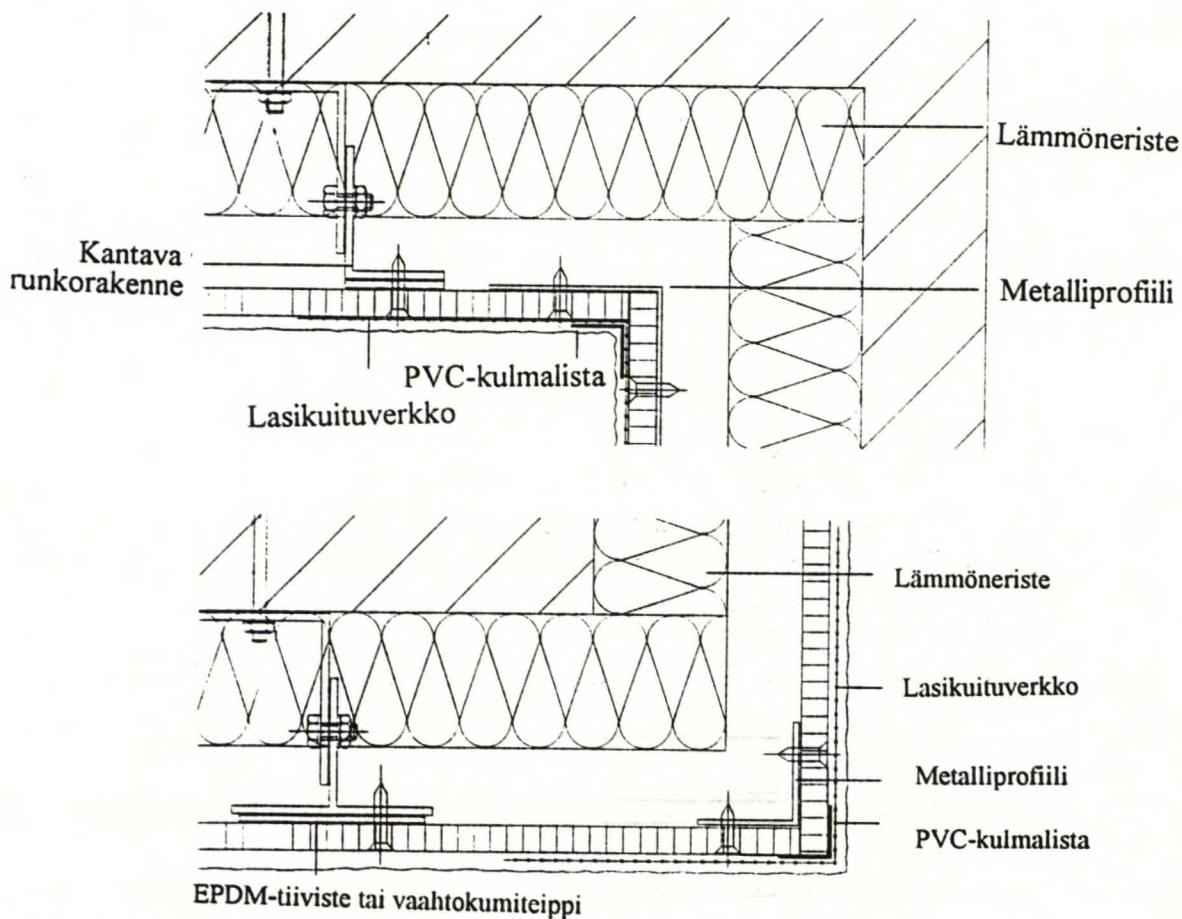
Levysaumat tehdään puskaumoina. Levyjen kiinnittämisen jälkeen levysaumojen päälle lisätään 66 mm leveä Simplex-teippi (Tyvec-teippi), joka on valmistettu kuituvahvisteisesta pape-rista. Teippi kiinnittyy levyihin kahden liimaraidan avulla, joiden väliin sauman kohdalle jää 20 mm leveä tartunnan estävä liimaton kaistale. Levytysalueen reunoilla teippi katkaistaan n. 50 mm ennen levyreunaa, jotta se jää kokonaisuudessaan rappauserroksen sisään. Pysty- ja vaakasaumarakenne on esitetty asennusohjeissa kuvan 6.5. mukaisena.

Pinnoitus tehdään vain tarkoitukseen hyväksytyillä orgaanisilla tai epäorgaanisilla rappaustuotteilla (esim. saksalaiset STO tai Knauf). Levysaumoihin asennetaan 250 mm leveä lasikuituverkko ja saumojen alueelle levitetään elastinen jäykistysrappaus, joka sisältää rakennetta vahvistavia kuituja. Sen jälkeen koko levypinnalle ruiskutetaan tai levitetään ohut pigmentoitu pintarappaus. Värjäämätöntä pintarappausta käytettäessä rappauspinta lisäksi maalataan rappaukseen soveltuvalla maalilla. Levyjen pinnoittamista ei ole välttämätöntä suorittaa välittömästi asennustyön jälkeen, sillä mikrosilikonikerros suojaa levyjä.

Englantilaisessa asennusohjeessa on annettu seuraavat ohjeet eri rakennedetaljien toteutuksesta metallista tukirankaa käyttäen. Rakenteessa olevat kulmat vahvistetaan lasikuituverkkoa ja PVC-kulmalistaa käyttämällä kuvan 6.6. mukaisesti.

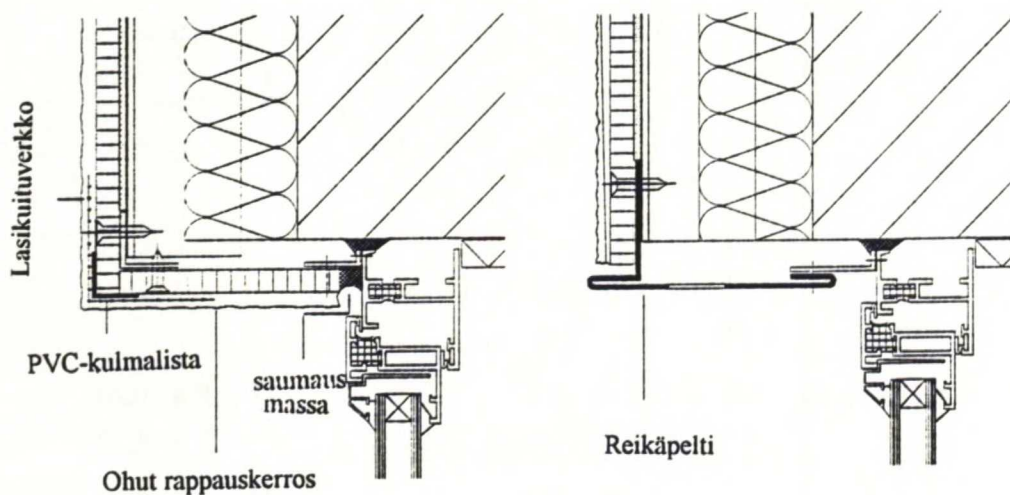


Kuva 6.5. BluClad-julkisivun pysty- ja vaakasaumojen rakenne /3/.

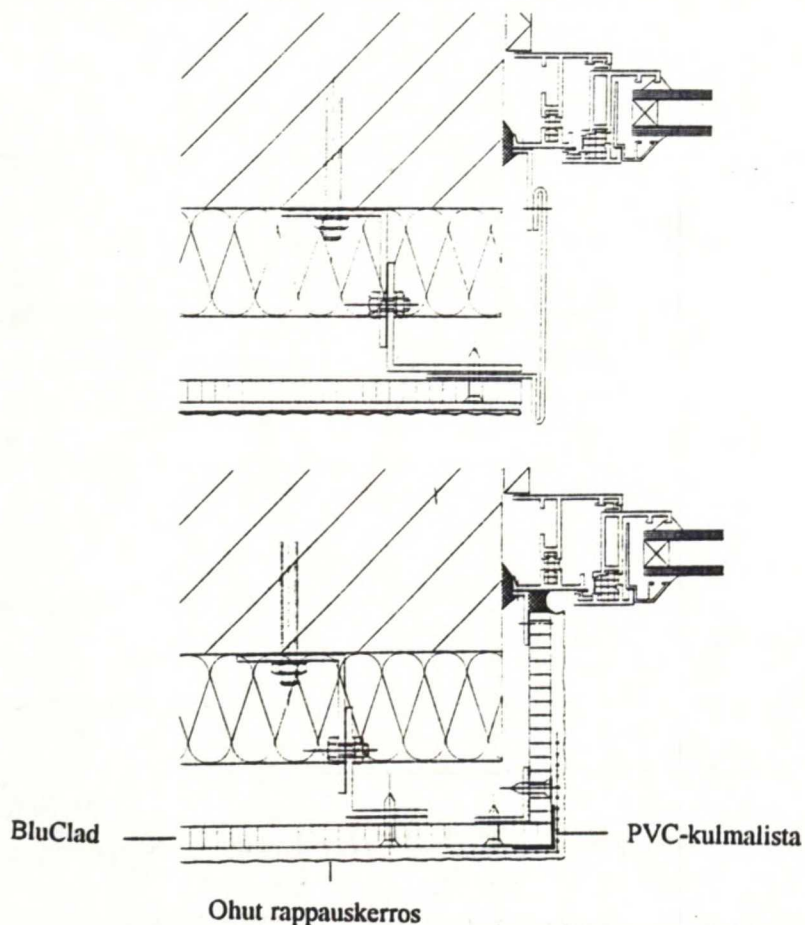


Kuva 6.6. Seinän sisä- ja ulkokulmadetaljit /3/.

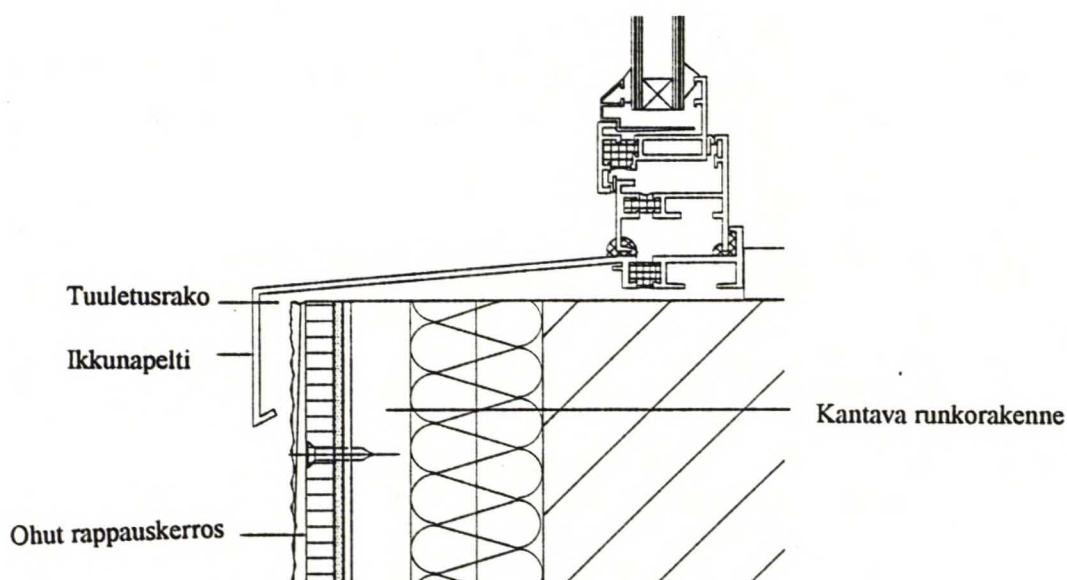
Ikkunapieli voidaan tehdä muovipinnoitetusta pelistä tai rapattuna rakenteena BluClad-levyä käyttäen. Ikkunan yläreunoista annettuja detaljivaihtoehtoja on esitetty kuvassa 6.7. ja ikkunapieli-vaihtoehtoja kuvassa 6.8. Ikkunan alaosan rakenneratkaisu näkyy kuvassa 6.9. Seinän ja sokkelin liittymässä käytetään esim. sinkittyä rei'itettyä peltiä ja alimman levyn alareunassa metalliprofiilia kuvan 6.10. mukaisesti.



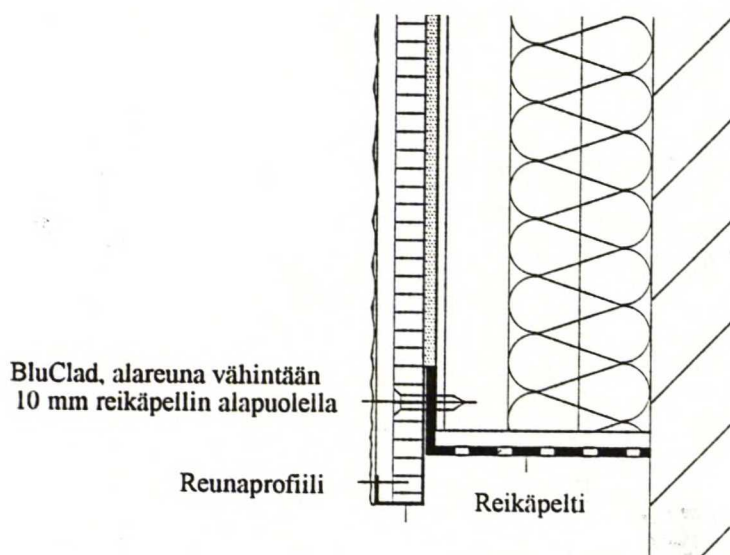
Kuva 6.7. Esimerkkejä ikkunan yläreunan rakenteesta /3/.



Kuva 6.8. Esimerkkejä ikkunapielen rakenteesta /3/.

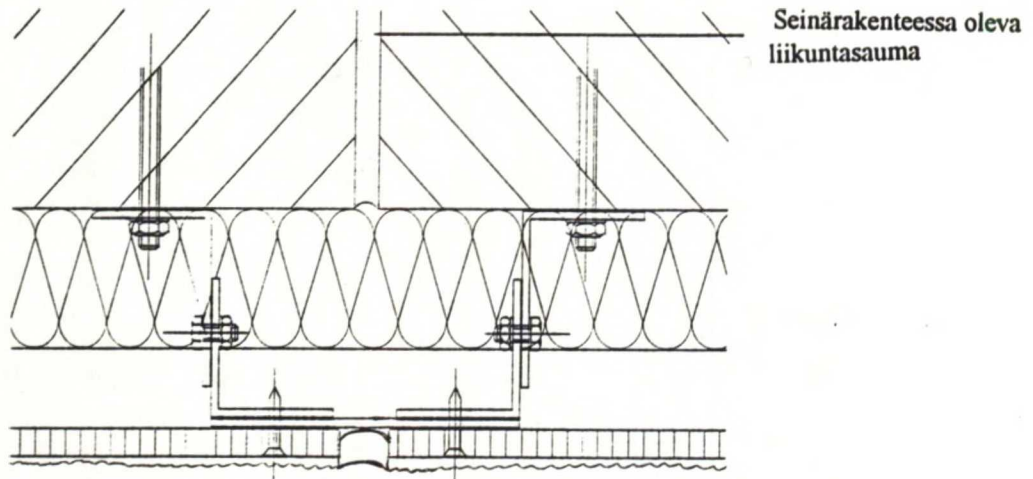


Kuva 6.9. Esimerkki ikkunan alareunan rakenteesta /3/.

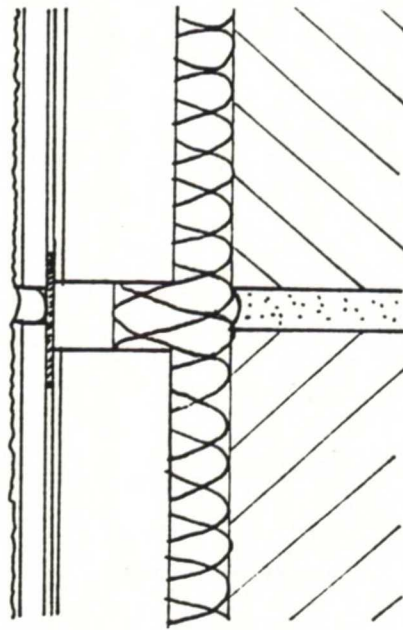


Kuva 6.10. Seinän alaosan liittyminen sokkeliin /3/.

Liikuntasaumat tehdään vähintään 6 metrin välein pysty- ja vaakasuunnassa sekä lisäksi pohja-seinässä olevien liikuntasaumojen kohdalle ja korjausrakenteen pinnan liittyessä vanhoihin pintoihin. Suunnitelmissa tulee varmistaa, etteivät korjausrakenteen pinnan suuntaiset liikkeet ylitä 6 mm:ä 2440 mm:n matkalla (kts. luku 6.2.3). Kuvassa 6.11. on esitetty pystysuuntaisen liikuntasauman rakenne ja kuvassa 6.12. vaakasuuntaisen liikuntasauman rakenne. Liikuntasaumassa levyn takana käytetään 50 mm leveää ja 2 mm paksua PVC-nauhaa. Levyjen väliin jätetään n. 12 mm leveä rako, joka saumataan elastisella saumaussmassalla.



Kuva 6.11. Pystysuuntaisen liikuntasauman rakenne.



Kuva 6.12. Vaakasuuntaisen liikuntasauman rakenne.

Suomessa käytetyin tukirankamateriaali on puu. Luvussa 9.3. on esitetty esimerkkirakenne puista tukirankaa käyttäen, jolloin edellisiä liittymädetaljeja vastaavat ja osittain parannetut ratkaisut puurakenteelle on annettu.

6.2. MEKAANINEN TOIMIVUUS

6.2.1. LEVYMATERIAALIN MEKAANISET OMINAISUUDET

BluClad-levyn mekaaniset ominaisuudet voidaan esittää taulukon 6.2. lukuarvojen avulla.

Taulukko 6.2.

BluClad-levyn mekaaniset ominaisuudet.

| | | |
|--|--------|-------------------|
| Tiheys | 1100 | kg/m ³ |
| Taivutuslujuus kuivana | 14 | MN/m ² |
| Kimmokerroin | 8,5 | GPa |
| pituussuunta | 7 | GPa |
| poikkisuunta | 0,0075 | mm/m°C |
| Lämpölaajeneminen 20 -100 °C | +0,1 | % |
| Kosteuseläminen normaaliolosuhteista kyllästettyyn | | |

Cape Ltd:n tuotevalikoimassa BluClad sijoittuu ominaisuuksiltaan Masterclad:n ja sisälevynä käytettävän Masterboard:n väliin. Masterclad:iin verrattuna BluClad:n materiaali on kevyempää ja hauraampaa ja sen lujuusarvot ovat alhaisemmat. Kosteus- ja lämpöeläminen on samaa luokkaa kuin Masterclad:n tapauksessa. BluClad:n päälle tuleva rappauskerros kuitenkin muuttaa pinnoitetun rakenteen painoa ja lujuusarvoja todellisessa rakenteessa. Käytettäessä pinnoitteena esim. Stolit-rappautusta, on pelkän rappauskerroksen paino märkänä n. 2,5 kg/m², jolloin levyn ja rappauksen yhteispainoksi tulee n. 13,5 kg/m². 10 mm paksu Masterclad-levy painaa 15 kg/m².

6.2.2. KESTÄVYYS TUULIKUORMIA VASTAAN

BluClad-levyn maksimitukivälit julkisivurakenteissa on esitetty taulukossa 6.1. levyyn vaikuttavien tuulikuormien suhteessa. Annettujen tukivälien arvioimiseksi on taulukossa 6.3. laskettu levyn maksimitukivälit tasaisen kuorman vaikuttaessa levyn pintaan. Arvot on laskettu kiinnitysväleillä 600 mm, 400 mm ja 300 mm käytettäessä uppokantaruuvia, jonka kannan läpimitta on 6 mm.

Taulukko 6.3.

BluClad-levyn maksimitukivälit uppokantaruuvia käytettäessä kiinnitysväleillä 600 mm, 400 mm ja 300 mm.

| | Tasainen kuorma (N/m ²) | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 750 | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 | 2250 | 2500 | 2750 | 3000 |
| Ruuvien kiinnitysväli (mm) | Maksimitukiväli (taipuma) (mm) | | | | | | | | | |
| 600 | 600 (0,9) | 600 (1,2) | 600 (1,5) | 400 (0,3) | 400 (0,4) | 400 (0,50) | 400 (0,7) | 300 (0,3) | 300 (0,3) | 300 (0,3) |
| 400 | 600 (0,9) | 600 (1,2) | 600 (1,5) | 600 (1,8) | 600 (2,1) | 600 (2,4) | 400 (0,7) | 400 (0,8) | 400 (0,9) | 400 (1,0) |
| 300 | 600 (0,9) | 600 (1,2) | 600 (1,5) | 600 (1,8) | 600 (2,1) | 600 (2,4) | 400 (0,7) | 400 (0,8) | 400 (0,9) | 400 (1,0) |

Taipumien laskennassa ruuvien kiinnityskuormana 10 mm paksulle levyille on käytetty 700 N ja rakennetta on käsitelty jatkuvana siten, että 600 mm tukivälillä levyä kannattaa 3 tukea, 400 mm tukivälillä 4 tukea ja 300 mm tukivälillä 5 tukea. Tukirangat on tuettu kaikilta neljältä sivultaan, jolloin tuille sallittava maksimikuorma ilman varmuuskertoimia on 12,1 MN/m² ja kimmokerroin 7,25 GN/m².

Vertailtaessa taulukoiden 6.1. ja 6.3. maksimitukivälejä voidaan nähdä, että asennusohjeessa annetut mitat vastaavat laskettuja maksimitukivälejä annetuilla kuormituksilla ja ovat siten riittäviä rakenteen tuulikuormien kestävyysvarmistamiseksi.

Luvussa 5.2.2. olleen mitoituskaavan 5.1. ja kuvan 5.10. perusteella Suomessa esiintyvänä suurimpana tuulen mitoituskuormana voidaan pitää n. $1,35 \text{ kN/m}^2$, jolloin rakenteen tukiväli 600 mm on riittävä kaikilla tuulikuormilla.

6.2.3. TASON SUUNTAISTEN TUULIKUORMIEN KESTÄVYYS

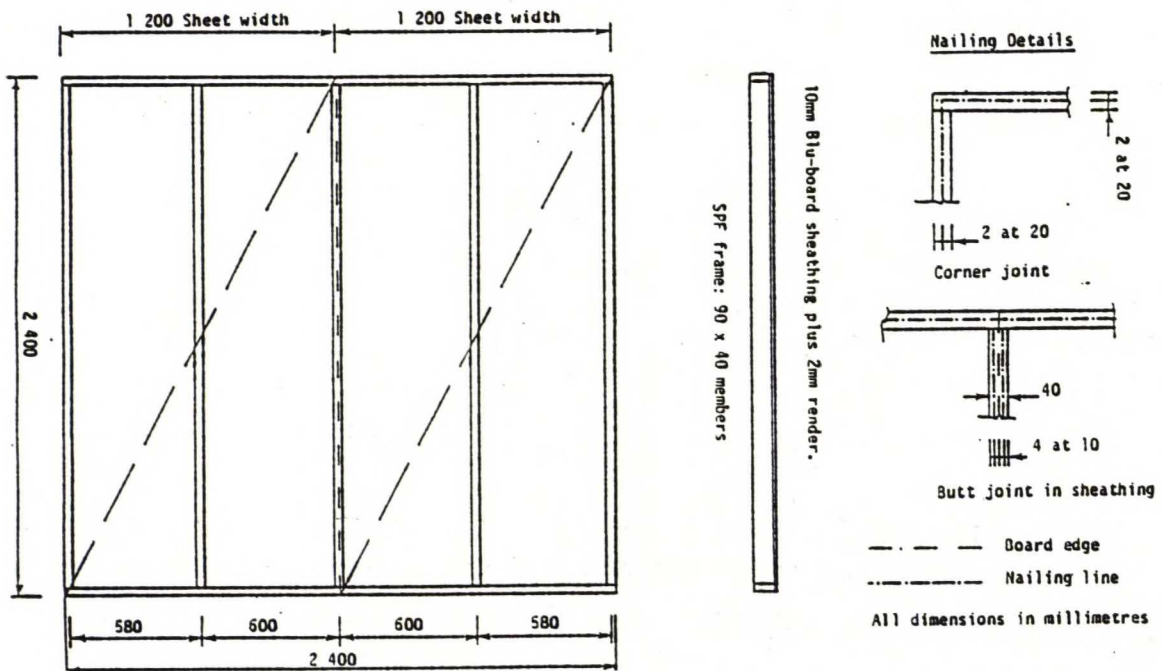
Rapatun BluClad-seinän kestävyttä ja levysaumojen käyttäytymistä levyn suuntaisten tuulikuormien aiheuttamien siirtymien vaikutuksesta tutkittiin Englannissa Surreyn Yliopiston Rakennusinsinööriosastolla raskaiden rakenteiden tutkimuslaboratoriossa. Tutkimus noudatti pääpiirteissään standardia BS 5268 (osa 6: kappale 5), jossa on esitetty menetelmä puurankaisen levyseinien tason suuntaisten tuulikuormien kestävyyskokeelliseen määrittämiseen. Standardin mukaista koetta muutettiin etenkin koekappaleiden osalta, koska tutkittava rakenne poikkesi tavanomaisesta saumallisesta levyseinärakenteesta. Tämän vuoksi, ja koska kutakin rakennetyyppiä kohden koestettiin vain yksi koerakenne, kokeen perusteella ei saatu varsinaisia seinän suunnitteluarvoja, vaan ennusteita todennäköisestä lujuustasosta. Varsinaisen lujuuden lisäksi kokeen avulla saatiin arvokasta tietoa rappausaumojen käyttäytymisestä.

Kokeessa käytettiin $2,4 \times 2,4 \text{ m}^2$ seiiniä, jotka oli kiinnitetty standardin mukaiseen puukehikkoon (kuva 6.13.). Tukivälit seinän keskellä olivat 600 mm ja sivuissa 580 mm. Ylä- ja alapuu kiinnitettiin pystytukiin kahdella $100 \times 4,3 \text{ mm}$ lankanaulalla. Levyt kiinnitettiin raamiin $50 \times 3,35 \text{ mm}$ galvanoiduilla lankanauloilla 150 mm kiinnitysvälillä levyjen reunoilla ja 300 mm kiinnitysvälillä keskellä levyä oleviin pystytukiin. Käytetyt rappauskerroksen materiaalit olivat seuraavat:

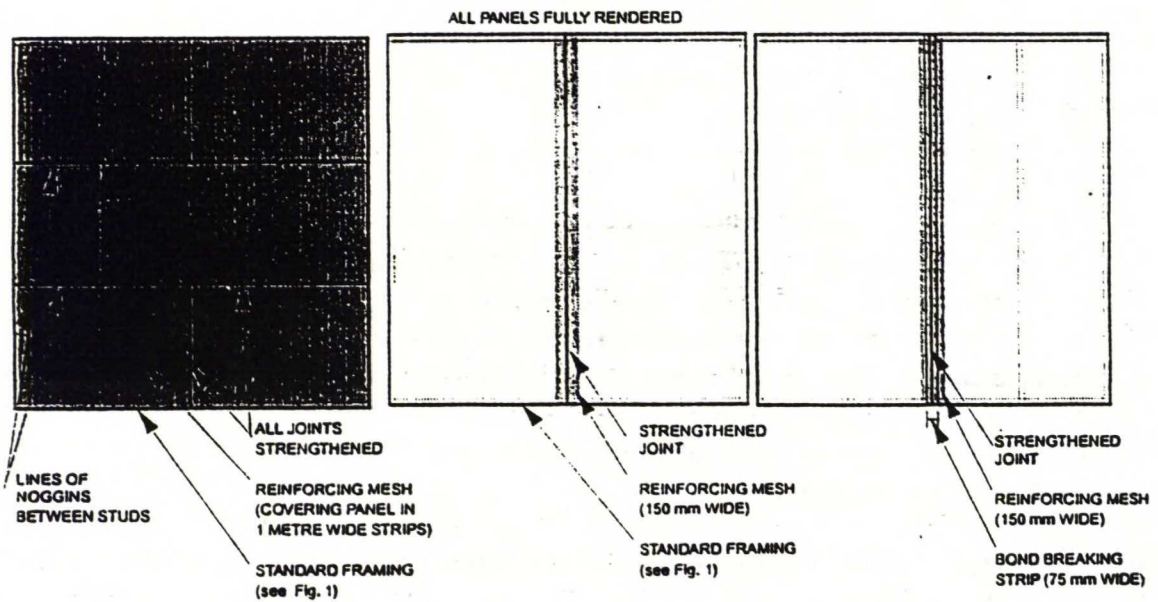
- Tartunnan estävä teippikaista, 75 mm, 55 g/m^2 , Tyvec
- Lasikuituvahvistusverkko upotettuna Sto RFP alusrappaukseen,
- Stolit 1,5K pintarappaus,

Koe suoritettiin kolmella erilaisella seinä- ja rappausrakenteella, jotka näkyvät kuvassa 6.14. Seinän nro 1 levyrakenne poikkesi eniten standardissa määritellystä seinärakenteesta. Käytetyt levykoot olivat $1200 \times 800 \text{ mm}^2$ sekä $600 \times 800 \text{ mm}^2$ ja levyt asennettiin tiiliseinän tavoin lomittain. Raamiin lisättiin poikki-pienat levyjen vaakasaumojen kohdalle. Lasikuituverkko asennettiin koko seinän alueelle ennen pintarappautusta. Seinien nro 2 ja 3 levyrakenne oli standardin mukainen, mutta lisäksi levypinnat rapattiin. Seinässä 2 lasikuituverkko oli 150 mm leveänä nauhana levysaumassa ja koko seinäpinta rapattiin. Seinään 3 asennettiin lasikuituverkon alle Tyvec-teippikaista, jossa oli levysauman kohdalla n. 37 mm leveä liimaton tartunnan estävä alue. Kaikissa tapauksissa pintarappaus lisättiin 24 tunnin kuluttua pohjarappauksen ja lasikuituverkon asentamisesta. Pintarappauksen annettiin kuivua vähintään 14 päivää ennen koetta.

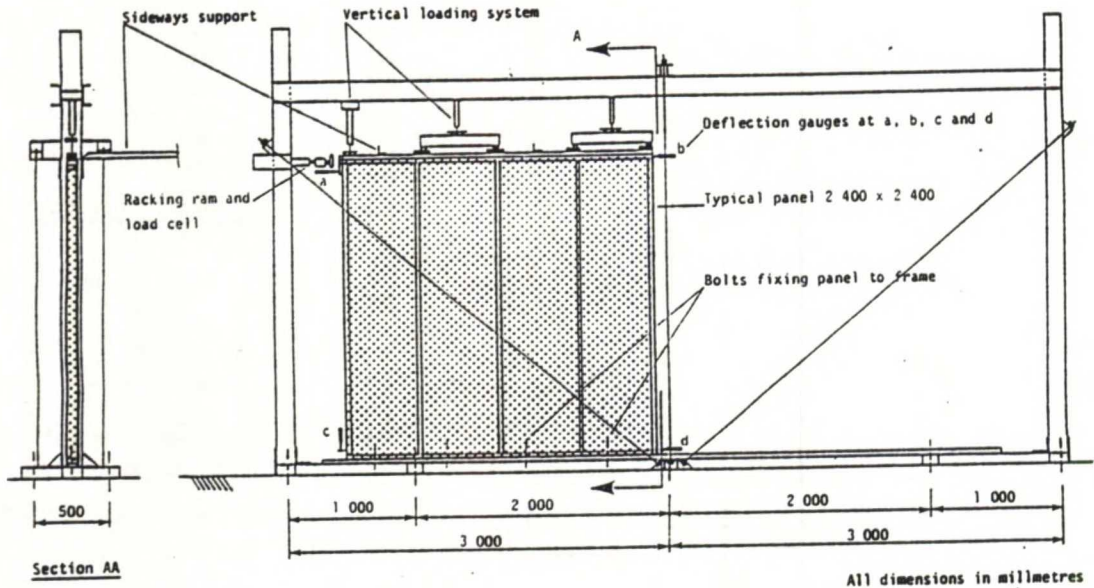
Testilaitte oli standardin mukainen (kuva 6.15.). Laitte mahdollistaa seinän pysty- ja vaakasuuntaisen kuormittamisen levytasossa, vaakasuuntaisen tasosiirtymän sekä seinän etukulman nousemisen. Koko seinän vaakasuuntainen siirtyminen laitteen suhteen on estetty. Seinän vaakasiirtymää mitataan seinän yläkulmissa, liukumista vaakakuormasta katsottuna taka-alakulmassa ja nousemista etualakulmassa.



Kuva 6.13. Kokeessa käytetty puukehikko ja levyjen naulauslinjat.



Kuva 6.14. Koestettujen seinien rakenneratkaisut.



Kuva 6.15. Standardin BS 5268 (osa 6: kpl 5) mukainen koestuslaite.

Koe suoritettiin kaikille rakenteille seuraavalla tavalla:

- Pystysuuntainen esikuorma nostettiin 0,75 kN/pystytuki 5 minuutin ajaksi,
- Asetettiin vaakasuora kuorma ilman pystykuormitusta siten, että vaakasiirtymä nousi 1,2 mm asti, ja sen jälkeen kuorma poistettiin,
- Seinä palautettiin siirtymättömään tilaan. Sen jälkeen ilman pystykuormaa seinä kuormitettiin kolmessa jaksossa 5 mm vaakasiirtymään ja sen jälkeen kerran 8 mm vaakasiirtymään,
- Seinään kohdistettiin pystykuorma 5 kN/pystytuki ja seinä palautettiin siirtymättömään tilaan,
- Seinä kuormitettiin kolmessa jaksossa 5 mm vaakasiirtymään,
- Seinä kuormitettiin ensin 8 mm vaakasiirtymään ja pienen tauon jälkeen kuormitusta lisättiin seinän rikkoontumiseen asti.

Viimeisessä vaiheessa koe erosi seinän nro 3 kohdalla siten, että seinän saavuttaessa 8 mm vaakasiirtymän vaakakuorma poistettiin ja aloitettiin sitten uusi kuormitus seinän rikkoontumiseen asti. Kaikissa tapauksissa kuormitusnopeus oli n. 1,0 mm/min. Kokeen aikana vaakasiirtymät luettiin elektronisesti ja johdettiin PC-tietokoneelle. Tuloksena saadut siirtymäkäyrät eri rakenteille ovat liitteessä nro 4.

Standardin mukaan käyttökuormien arvioimiseksi kirjattiin $0,002 \times$ seinäkorkeuden suuruisen vaakasiirtymän aiheuttaneiden vaakakuormien suuruudet ilman pystykuormaa sekä 5 kN pystykuormalla. Murtokuorma oli rakenteiden kestävä maksimikuorma. Eri kuormien arvot olivat taulukon 6.4 mukaisia.

Taulukko 6.4.

5 mm vaakasiirtymän aiheuttaneet vaakakuormat pystykuormilla 0 kN / pystytuki ja 5 kN / pystytuki sekä rakenteiden murtokuormat.

| Koeseinä | Vaakakuorma (kN) (Pystykuorma 0 kN/tuki, vaakasiirtymä 5 mm) | Vaakakuorma (kN) (Pystykuorma 5 kN/tuki, vaakasiirtymä 5 mm) | Murtokuorma (kN) (Pystykuorma 5 kN/tuki) |
|----------|--|--|---|
| 1 | 6,92 | 11,97 | 18,76 |
| 2 | 5,01 | 9,88 | 17,05 |
| 3 | 5,79 | 9,81 | 17,69 |

Kaikilla seinillä 5 mm vaakasiirtymän aiheuttava vaakakuorma oli n. 60 % murtokuormasta. Käytännössä turvallisena käyttökuormana voidaan pitää n. 40 % murtokuormasta, jolloin siirtymät ovat alle 5 mm. Seinien pysyvät muodonmuutokset olivat verrattain suuria, mutta pysyivät standardissa annetuissa rajoissa, eivätkä näin vaikuttaneet saatujen tulosten arviointiin. (Pysyvä muodonmuutos 1. kuormituskerran jälkeen pienempi kuin $0,0005 \times$ seinän korkeus ja 3. kuormituskerran jälkeen pienempi kuin $0,001 \times$ seinän korkeus.)

Pystykuorman ollessa 0 kN / pystytuki ei minkään seinän rappauspinnoissa havaittu vahingoittumista 5 mm tai edes 8 mm vaakasiirtymän jälkeen. Tämä oli odotettavissa, koska ilman pystykuormaa levyjen väliset liikkeet ovat yleensä hyvin pieniä jopa murtokuormalla, jolloin vaakasiirtymä saattaa olla 20 mm. 5 kN pystykuormalla ei myöskään havaittu rappauspinnan vaurioita 5 mm tai 8 mm vaakasiirtymillä. Tässäkin tapauksessa levyjen väliset liikkeet jäivät yleensä pieniksi ollen maksimissaan 1 mm pystysuuntaan ja normaalisti paljon sitäkin pienempiä.

Murtokuormituksessa kaikki seinät pysyivät vahingoittumattomina 10 mm vaakasiirtymään asti, jonka jälkeen seinän nro 1 käyttäytyminen poikkesi kahdesta muusta seinästä erilaisen rakenteensa vuoksi. Ensinnäkin saavutettu murtokuorma oli suurempi ja toiseksi murto-kuormaa vastaava vaakasiirtymä (n. 21 mm) oli pienempi kuin koeseinillä nro 2 ja 3. Seuraavan 15 mm siirtymän aikana kuorma pysyi vakiona, jonka jälkeen se hitaasti putosi. 45 mm vaakasiirtymän jälkeen seinä menetti nopeasti lujuutensa. Näkyvät vauriot ilmaantuivat vasta murto-kuorman saavuttamisen jälkeen. Tällöin vetorasituksesta johtuen seinän vaakakuorman puoleisessa alanurkassa naulankannat tulivat levystä läpi. Puristusrasitus vaakakuorman vastaisella sivulla aiheutti vaakasaumoissa alemman levyn jakaantumista lamelleihin sekä alajuoksun rikkoontumista viimeisen pystytuen alla. Vaakasiirtymän suurentuessa pystytuki nurjahti ja repeytyi irti alajuoksusta. Tästä syystä sekä levyjen irrottua vetopuolella alajuoksusta kuorma kohdistui pääasiassa puuraamiin, jonka rikkoontuessa kuorma nopeasti putosi.

Murtokuormituksen aikana seinässä nro 1 huomattiin vain hyvin vähän levyn välisiä liikkeitä, eikä rappauspinnan halkeilua esiintynyt. Kaksi pientä vaakasuuntaista kohoumaa havaittiin kahdessa vaakasaumassa 15 mm vaakasiirtymästä lähtien. Pystysaumoissa ei vastaavaa tapahtunut johtuen vaakasaumojen kohdalla olevien poikki-pienojen jäykistävästä vaikutuksesta. 30 mm vaakasiirtymällä tapahtui jonkin verran liikkumista ylempien levyjen välisen sauman yläosassa.

Seinät nro 2 ja 3 käyttäytyivät keskenään samanlaisesti aina 30 mm vaakasiirtymään asti, jolloin seinä nro 2 saavutti maksimikuormansa (17 kN), ja kuorma alkoi hitaasti pudota. Vaurioitumi-

nen tapahtui ensin vaakakuorman puoleisessa alanurkassa, jossa vetorasituksesta johtuen levy rikkoontui ensimmäisen naulan ympäriltä ja sen jälkeen levynaulojen kannat menivät järjestyksessä yksi kerrallaan levystä läpi. Puristuspuolella pystytuun ja levyn välinen liike oli 9 mm kokeen lopussa, ja tämä liike aiheutti levyn rikkoontumista naulauskohdissa. Alaosastaan levy alkoi jakautua lamelleihin ja irtosi alajuoksusta. Levyjen välisen sauman lujuus pahensi vaurioita koko alajuoksun ja taaimmaisen pystytuen pituudella. Lopullinen rikkontuminen aiheutui kehikon leikkaantumisesta, jolloin 50 mm siirtymän jälkeen seinän lujuus putosi nopeasti.

Seinän nro 3 maksimikuorma pysyi vakiona (17,5 kN) vaakasiirtymien 40 mm ja 60 mm välillä ja alkoi sitten pudota hitaasti. Veto- ja puristusalueiden vauriot olivat samanlaisia kuin seinällä nro 2, mutta ne tapahtuivat suuremmilla vaakasiirtymillä. Normaalista poiketen alajuoksu halkesi vaakakuorman puoleisen pystytuen alla. Tämä johtui todennäköisesti materiaalin paikallisesta heikkoudesta, eikä vaikuttanut seinän muuhun käyttäytymiseen. Koe lopetettiin 70 mm vaakasiirtymässä.

Seinien nro 2 ja 3 levyjen välisten pystysaumojen liikkeitä voidaan verrata tavallisen saumallisen levyrakenteen liikkeisiin. Seinällä nro 2 levyjen väliset liikkeet olivat rappauksesta johtuen huomattavasti saumallista rakennetta pienempiä. Kokeen loppuessa 55 mm vaakasiirtymä oli aiheuttanut n. 10 mm suhteellisen siirtymän levyjen välille. Rappauspinnassa ei esiintynyt halkeilua.

Seinässä nro 3 levysaumassa oleva tartunnaton rappauskaistale alkoi erottua rappauspinnasta jo murtokuormituksen alussa, kun vaakakuormituspisteestä katsoen taaemman levyn reuna nousi suhteessa etummaiseen levyyn. Vaakasiirtymän kasvaessa erottuminen tuli voimakkaamaksi, mutta levyjen välinen liikkuminen kasvoi hitaammin. Kun 15 mm vaakasiirtymällä levyjen välinen siirtyminen oli 5 mm, oli se 70 mm vaakasiirtymällä vain 9 mm. Tästä voidaan päätellä lasikuituverkon vahvistaneen rakennetta alkuliikkumisen jälkeen, jolloin lopullinen siirtymä vastasi seinää nro 2. Rappausauman aikainen myötääminen vaikutti luultavasti siihen, että seinän muut vauriot tapahtuivat myöhemmin kuin seinän nro 2 tapauksessa.

Kuten aikaisemmin mainittiin, kokeiden käsittäessä vain yhden koeseinän kutakin rakenneyhtyyppiä kohden ja seinän nro 1 poiketessa ratkaisevasti standardissa määritetystä rakenteesta, ei tuloksia voida tulkita kovinkaan tarkasti. Kuitenkin voidaan todeta, että seinä nro 3, jossa oli tiilimäisesti asetetut pienet levyt, ylimääräiset poikki pienet vaakasaumoissa sekä koko seinän peittävä lasikuituverkko, oli huomattavasti siniä nro 2 ja 3 parempi sekä lujuudessa että jäykkyudessa. Verrattuna tavanomaiseen saumalliseen levyrakenteeseen olivat seinät nro 2 ja 3 kuitenkin lujempia. Seinät nro 1 ja 2 rikkoontuivat suhteellisen pienillä sivusiirtymillä, joka luultavasti johtui seinän käyttäytymisestä yhdestä levystä tehdyn rakenteen tavoin rappauksen jäykistäessä levysaumoja.

Samassa puurunkoisia levyseiniä käsittelevässä standardissa on annettu kaava, jolla jopa yhden kokeen perusteella voidaan laskea rakenteen levynsuuntaisen vaakakuorman kestävyys suunnitteluarvo pystykuormalla 0 kN. Seinälle määritellään varmuuskerroin, ja saatu kuorma jaetaan seinän pituudella. Lisäksi kestävyys jaetaan sertifikaatissa määrättyllä luvulla 1,77, jotta kestävyys kuormalla 5 kN/tuki vastaa pystykuormitusta 0 kN. Varmuuskertoimeen vaikuttaa kaksi tekijää, levytyyppi ja suoritettujen kokeiden määrä. Aiemmin tehtyjen saumallisten levyjen tutkimuksissa, jossa oli käytetty samantyyppistä, mutta hieman pehmeämpää Masterboard-sisälevyä, oli tämän tyyppiselle materiaalille saatu varmuuskerroin 1,6, kun kyseessä oli useita kokeita sisältävä tutkimusohjelma. Kun kokeita suoritetaan vain yksi, on sertifikaatissa annettu

korjauskerroin 0,8. Tällöin kestävyys tason suuntaiselle vaakakuormalle (BRR = Basic Racking Resistance) saadaan kaavalla

$$BRR = \frac{\text{Kokeessa saatu murtokuorma} \times 0,8}{1,6 \times 2,4 \times 1,77} \quad (6.1)$$

Tutkituille seinärakenteille kaavalla 6.1. lasketut tason suuntaiset vaakakuorman kestävydet ovat seuraavat:

| | |
|--------------|-----------------|
| Seinä nro 1: | BRR = 2,21 kN/m |
| Seinä nro 2: | BRR = 2,01 kN/m |
| Seinä nro 3: | BRR = 2,08 kN/m |

Kaikki nämä arvot ylittävät 1-luokan levytykselle samassa standardissa annetun vaatimuksen 1,88 kN/m (naulojen halkaisija vähintään 3,35, pituus 50 mm, naulausväli 150 mm levyjen reunoissa ja 300 mm keskellä). Saatuja arvoja voidaan pitää hyvinä jo yhdellä kokeella tehtynä. Lisäkokeet vastatessaan saatuja lujuuksia vain parantaisivat suunnitteluarvoa.

Kokeen aikana rappauspinnat kestivät erittäin hyvin. Lasikuituverkko yhdistettynä elastiseen pohjarappaukseen esti näkyvien halkeamien muodostumisen rappauspintaan. Tiiliseinämainen kiinnitys ja pienet levykoot mahdollistivat rappauksen tehokkaimman hyväksikäytön. Yhden kokeen perusteella ei voida tehdä merkittävää eroa tartunnan estävän saumakaistan sisältävän ja pelkän lasikuituverkon avulla toimivan rakenteen välille. Käyttökuormilla saumakohtien näkyminen rakenteessa on epätodennäköistä, vaikka tartunnan estävää saumateippiä käytettäisiin.

Kokeen perusteella rapatun BluClad-rakenteen kestävyys vaakasuuntaisten kuormien aiheuttamia levypinnan suuntaisia siirtymiä vastaan on riittävä täyttämään julkisivurakenteelle asetetut vaatimukset, eikä rappaussauma tule näkyviin normaaleilla käyttötilan kuormituksilla, käytettiinpä levysaumassa tartunnan estävää saumateippiä tai ei.

6.2.4. KANTAVUUS

Käytettäessä rappaamalla pinnoitettua ja tuuletusraollista BluClad-rakennetta julkisivun saneerausissa on korjausrakenteiden paino samaa luokkaa kuin Mastercladia käytettäessä. Niinpä korjausrakennetta ei yleensä tarvitse ottaa huomioon runkorakenteiden lisärasituksena ja perustusten vahvistamista ei tarvita.

BluClad-levyjen kiinnitys vanhaan seinärakenteeseen tapahtuu samalla tavalla kuin on esitetty luvussa 5.2.3. Masterclad:n, Masterstonen ja Chromaclad:n tapauksessa.

6.2.5. ISKUNKESTÄVYYS

Rapatun BluClad-levyn iskutkeys-koe suoritettiin Englannissa Cape R & D -laboratoriossa samanlaisella standardin BS 8200 mukaisella kokeella kuin Mastercladin tapauksessa.

Koekappale oli valmistettu kiinnittämällä BluClad-levy vaakasuoraan puukehikkoon, jossa tukiväli oli 600 mm, ja rappaamalla levyn pinta orgaanisella Stolit 1.5K ohutrappauksella. Kokeessa 0,5 kg teräspallo (halkaisija 50 mm) pudotettiin kolmelta eri korkeudelta tutkittavan

materiaalin päälle. Kokeen aikana tehtiin taulukossa 6.5. esitettyjä havaintoja eri iskuenergian suuruuksilla.

Taulukko 6.5.

Havainnot BluClad-levyn iskutkeys-kokeessa.

| Iskuenergia (Nm) | Iskujen määrä (kpl) | Havainnot |
|------------------|---------------------|---|
| 3 | 1 | Ei näkyviä vaurioita |
| 6 | 23 | Pahin vaurio iskukohdan sijaitessa alle 20 mm päässä tukipuusta: painuma, jonka halkaisija 20 mm ja syvyys 1,0 - 1,5 mm, sekä pinnoitteen murtuminen painuman reunan ympärillä (6 tapausta). Tavallinen vaurio: painuma, jonka halkaisija n. 20 mm ja syvyys 1,0 mm. |
| 10 | 7 | Painuma, jonka halkaisija 25 mm ja syvyys 2 - 3 mm, sekä pinnoitteen murtuminen painuman reunan ympärillä. |

Verrattaessa rapatulla BluClad:lla tehdyn iskutkeys-kokeen tuloksia Masterclad:lla saatuihin kuvissa 5.11. ja 5.12. esitettyihin tuloksiin, huomataan, että rapatun BluClad:n vaurioituminen tapahtui painuman syvyyden kasvuna yli 1 mm raja-arvon alemmalla iskuenergialla kuin vastaavan paksuisella Masterclad-levyllä. Masterclad rikkoontui hauraammin, sillä painuman syvyyden kasvaessa yli 0,15 mm levyn takapinta kohosi iskukohdassa ja pieniä repeämiä syntyi takapinnalle. Tämä ero johtuu luonnollisesti siitä, että BluClad:n tapauksessa iskurasitus kohdistui rappauspintaan eikä itse levymateriaaliin.

BluClad:n iskunkestävyys on samaa luokkaa kuin 4,5 mm paksun Masterclad-levyn, paitsi että BluClad:lla ei esiintynyt takapinnan halkeilua. Masterclad:n käyttösuosituksia soveltaen BluClad:a voidaan suositella käytettäväksi yleisillä paikoilla yli 6 m:n korkeudessa tai yli 1,5 m:n korkeudessa paikoissa, joissa iskurasituksien mahdollisuus on pieni (asuintalot). Englannissa tutkitaan parhaillaan, miten paljon lasikuituverkon käyttö koko seinäpinnan alueella parantaa rakenteen iskunkestävyyttä. Etukäteen on arvioitu, että tällä tavoin rapattua rakennetta voitaisiin käyttää myös vaurioalttiimmissa paikoissa.

Rapattu BluClad-rakenne on iskunkestävyydeltään parempi kuin perinteisellä lämpörappauksella tehty julkisivupinta, jossa rappaus tehdään suoraan rappausverkon ja lämmön-eristeen päälle. Lämpörappauksen tapauksessa vaarana on, että koko rappauspinta rikkoontuu rappausverkossa olevan reiän kohdalla, ja siten muodostuu suora yhteys ulkoilmasta lämmön-eristekerrokseen. Nykyään tosin on lämpörappauksen iskunkestävyyttä vaurioalttiissa kohteissa usein parannettu kaksinkertaista verkotusta käyttämällä.

6.2.6. LÄMPÖ- JA KOSTEUSLIIKKEET

BluClad:n lämpö- ja kosteusliikkeiden suuruudet on esitetty taulukossa 6.2. Maksimi kosteus-eläminen on 1 mm/m, eli levyn pituussuunnassa 2,5 mm, joten teoriassa levyjen vaaka-saumoissa sauman muodonmuutoskyky tulee olla 2,5 mm. Lämpölaajeneminen on kosteus-elämistä pienempää.

Jos levysaumassa käytetään tartunnan estävää saumateippiä, jää saumaan 20 mm alue, jossa muodonmuutos tapahtuu. Ilman saumateippiä muodonmuutoksia jakavana komponenttina toimii lasikuituverkko, jolloin tarkkaa muodonmuutosaluetta ei voida määrittää.

Luvussa 8.2. on selostus rapatun rakenteen säärasituskokeesta sääkaapissa. Kokeen aikana rappauspinnan lämpötila vaihteli välillä $-20 - +50^{\circ}\text{C}$ ja kosteusolosuhteita muuteltiin sadetuksen ja IR-säteilyn avulla. Seinän rappaussaumoissa käytettiin osittain tartunnan estävää teippiä ja osittain pelkkää lasikuituverkkoa upotettuna pohjarappaukseen. Kokeen tuloksena ei rappauspinnassa havaittu minkäänlaisia vaurioita, joten käytetyt rappausmateriaalit, jotka on esitelty luvussa 8.2.2., kestivät hyvin levyssä esiintyneet lämpö- ja kosteusliikkeet, jotka saumojen alueella olivat maksimissaan $0,55\text{ mm/m}$.

Rappauspinnoitteen saumarakenteen muodonmuutoskykyä on jatkossa tutkittava kokeellisesti eri lämpötiloissa ja eri rappausmateriaaleja käytettäen. Tarkoitukseen soveltuu yksinkertainen sauman nykytyskoe, joka tehdään käyttäen muuttujana nykytysliikkeen amplitudia, nopeutta ja määrää. Kokeen tuloksena saataisiin rappausmateriaalien maksimimuodonmuutoskyky, mutta ajan vaikutusta rappauksen ominaisuuksiin ei tässä kokeessa voida ottaa huomioon muuten kuin materiaalin väsymisen osalta.

6.3. RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

6.3.1. SATEENPITÄVYYS

BluClad:n vedenpitävyys on tutkittu standardin BS 4624 (1981, osa 3, kappale 15) mukaan ja levy todettiin vedenpitäväksi. Levyn vesihöyrynvastus 20°C lämpötilassa ja 65 % suhteellisessa kosteudessa on $1,1 \times 10^9\text{ m}^2\text{sPa/kg}$, joka vastaa puolikovan puukuitulevyn vesihöyrynvastusta.

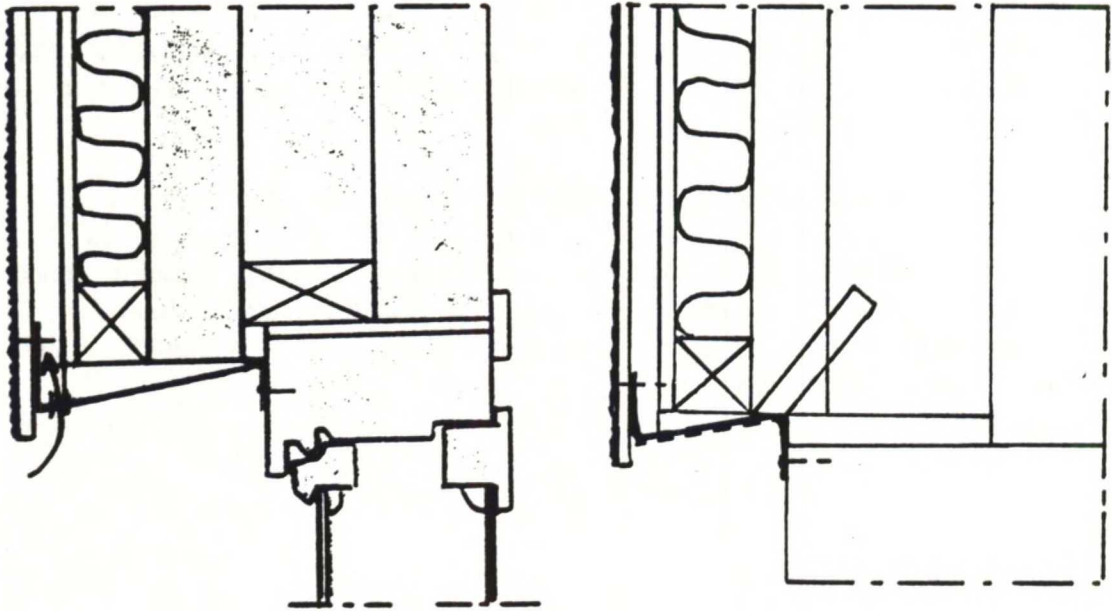
Saksassa Institut für Bauphysik:n tekemän tutkimuksen mukaan Stolit-rappauksen (raekoko $1,5\text{ mm}$, menekki $2,4\text{ kg/m}^2$) vesihöyrynvastus on $4,8 \times 10^9\text{ m}^2\text{sPa/kg}$, eli saksalaisen määrittelyn mukaan vesihöyrynvastusta vastaava ilmakerroksen paksuus on $1,0\text{ m}$. Rappauksen kapillaarisesti imemän veden määrä on $0,04\text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$. Saksassa materiaali katsotaan vedenpitäväksi, jos sen vesihöyrynvastusta vastaava ilmakerroksen vastus on suurempi kuin $0,5\text{ l/m}$, kapillaarisesti imemän veden määrä on pienempi kuin $0,5\text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ja näiden suhde on suurempi kuin 10. Stolit:lle tämä suhde on $25\text{ mh}^{1/2}/\text{kg}$, joten kaikki annetut vaatimukset täyttyvät.

Luvussa 7.2. on kokeellisesti tutkittu rapatun BluClad-rakenteen sateenpitävyyttä käytettäessä saksalaisen Sto:n rappautuotteita luvun 7.2.2. mukaisesti. Kokeessa rapattu levyrakenne todettiin täysin sateenpitäväksi ja saumarakenne vesihöyryä läpäiseväksi.

Luvussa 8.2. esitetty säärasituskoe osoitti rakenteen liittymädetaljien merkittävyyden rakenteen sateenpitävyydessä. Vaikka levyrakenne itsessään olisi esimerkillisen sateenpitävä, saattaa huomosti suunniteltujen ja toteutettujen rakenneyksityiskohtien, kuten seinässä olevien vesipeltien kohdalta päästä huomattavia määriä vettä rakenteeseen. Näiden liittymädetaljien huolellinen kohdekohtainen suunnittelu ja työn laadun valvonta työmaalla on siis ensiarvoisen tärkeää.

Luvussa 6.1.2. esitetyt rakennedetaljit ikkunan yläreunasta (kuva 6.7.) ja seinän liittymisestä sokkeliin (kuva 6.10.) eivät riittävästi ota huomioon rakenteeseen mahdollisesti tiivistyvän tai

liittymädetaljeista pääsevän ja alaspäin valuvan veden poispääsyä rakenteesta. Kuvassa 6.7. esitettyssä rapatussa ikkunan yläreunassa ei ole edes minkäänlaista tuuletusrakoa. Näiden rakenneratkaisujen sijasta tulisi käyttää rakenteita, jotka vaakaosiltaan viettävät seinästä pois-päin siten, että levyn taakse mahdollisesti joutunut vesi valuisi pois tuuletusreikien kautta (kuva 6.16.).



Kuva 6.16. Vaakaliittymien parannettuja ratkaisuja: ikkunan yläpieli ja sokkeliliittymä.

6.3.2. LÄMMÖNERISTÄVYYS

Luvussa 5.3.2. on arvioitu julkisivun levykorjausmenetelmässä tarvittavia lisäeristyspaksuuksia erilaisille korjattaville seinärakenteille, kun tavoitteena on Srmk:ssa annettu k-arvovaatimus $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kyseiset eristepaksuudet koskevat myös rapattua BluClad-korjausrakennetta.

BluClad-levyn lämmönjohtavuus $0,19 \text{ W/mK}$ (BS 874: osa 2: kappale 2.1: 1986). Vaikka ulkoverhouksen lämmöneristyskyky rapattuna on parempi kuin Masterclad:lla, ei sillä ole juuri-kaan vaikutusta tuuletusraoillisen rakenteen lämmöneristyskykyyn, koska verhoukset sijaitsevat tuuletusraon kylmällä puolella ja tuuletusraon lämpöteknisen toiminnan kannalta ratkaiseva tekijä on virtausnopeus raossa. Koska BluClad-rakenteen yhteydessä käytetyn tuuletusraon leveys ja rakomalli vastaa Masterclad:n tapausta, tuuletusraon ja ulkoverhouksen vaikutusta seinän k-arvoon voidaan arvioida luvun 5.3.2. perusteella.

Rapatussa BluClad-seinässä tuuletusraon korkeus määräytyy tapauskohtaisesti rakennuksen seinän eri osissa riippuen kerroksien määrästä, aukkojen sijainnista ja muista yksityiskohdista. Levysaumoissa ei ole virtauskenttää muuttavia rakoja. Kuitenkin korkeilla seinillä tuuletusraon lämpötila saavuttaa tietyn vakioarvon, jolloin esim. 8,4 m korkeassa raossa k-arvon parannus ei ole kovinkaan suuri kerroksen korkuiseen tuuletusrakoon verrattuna. Samoin kuin Masterclad:n tapauksessa, tuuletusraolla saavutettavana seinärakenteen k-arvon parannuksena Srmk:n mukaisesti laskettuun arvoon verrattuna voidaan käyttää n. $0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$.

6.3.3. RAKENTEEN KOSTEUDET JA KOSTEUDENPOISTOKYKY

Luvussa 5.3.3. on käsitelty saumallisen levykorjausmenetelmän tapauksessa seinärakenteen kosteudenlähteitä ja tuuletusraon kosteudenpoistokykyä. Rapatun BluClad-levykorjauksen kosteustekninen toiminta vastaa täysin tutkittua rakennetta, joten luvussa esitetyt asiat koskevat myös BluCladilla tehtävää julkisivukorjausta. Kuten edellä on mainittu, rapatussa ulko-verhouksessa ei ole virtauksia aiheuttavia rakoja verhoukslevyjen välillä, joten tuuletusraon kosteudenpoistokyky määräytyy todellisten tuuletusraon korkeuksien eli rakenteiden korkeusmittojen mukaan. Siten myös luvussa 5.3.3. tutkittu 8,4 m korkea tuuletusrako on sellaisenaan mahdollinen, toisin kuin Masterclad:n tapauksessa.

6.4. AJAN VAIKUTUKSET RAKENTEEN OMINAISUUKSIIN

6.4.1. PITKÄAIKAISKESTÄVYYS

Rappaamattoman BluClad-levyn pakkasenkestävyyttä on tutkittu Englannissa Cape R & D -laboratoriossa täysin vedellä kyllästettynä sekä n. 80 % suhteellisessa kosteudessa. Kokeessa 150 x 25 mm levynpalaset upotettiin ensin veteen 24 tunnin ajaksi. Tämän jälkeen kyllästetyistä kappaleista erotettiin vertailukappaleet, jotka koestettiin heti 3-pistetaivutuksella. Loput koe-kappaleet laitettiin muovipusseihin jäädytys-sulatuskoetta varten. Koekappaleet jaettiin kahteen osaan, ja toiseen puoleen muovipusseista lisättiin n. 10 ml ylimääräistä vettä täysin kyllästetyn olotilan varmistamiseksi. Koekappaleilla suoritettiin 20, 50 tai 100 jäädytys-sulatusjaksoa seuraavan ohjelman mukaisesti:

| | |
|----------------------|------------|
| 20 °C | alussa |
| 20 °C:sta -20 °C:een | 2 tunnissa |
| -20 °C | 1 tunti |
| -20 °C:sta 20 °C:een | 2 tunnissa |
| 20 °C | 1 tunti |

Tehdyn jäädytys-sulatuskokeen jälkeen koekappaleet punnittiin ja niitä säilytettiin jälleen 24 tuntia vesiupotuksessa. Kappaleet punnittiin uudestaan ja koestettiin 3-pistetaivutuksella. Läpikäydyn 3-pistetaivutuskokeen tulokset näkyvät taulukossa 6.6.

Täysin vedellä kyllästetyn levyn tapauksessa voidaan nähdä materiaalin lujuusominaisuuksien huononemista. 80 % kosteustilassa ei levyssä tapahtunut muutoksia 100 jäädytys-sulatusjakson jälkeen. Todellisessa rakenteessa, jolloin BluClad-levyä käytetään aina pinnoitettuna, täysin vedellä kyllästetty tilanne on hyvin epätodennäköinen, joten alemmassa kosteustilassa saadut tulokset antavat paremman kuvan levyn kestävydestä.

Taulukko 6.6.

BluClad-levyn jäädytys-sulatuskokeen tulokset täysin vedellä kyllästettynä sekä n. 80 % kosteustilassa.

| Jaksojen määrä (kpl) | Materiaalin kosteus (%) | Kimmokerroin (GN/m ²) | Taivutuslujuus (MN/m ²) | Murtovenymä (%) | Tiheys (kg/m ³) |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 0 | 100 | 3,30 | 9,80 | 0,73 | 1069 |
| 20 | 100 | 1,80 | 8,30 | 1,56 | 1080 |
| 50 | 100 | 1,90 | 8,50 | 2,35 | 1070 |
| 100 | 100 | 1,75 | 8,10 | 2,08 | 1067 |
| 0 | | 3,30 | 9,80 | 0,73 | 1069 |
| 20 | 83 | 3,30 | 9,60 | 1,29 | 1084 |
| 50 | 85 | 3,30 | 9,80 | 1,09 | 1090 |
| 100 | 77 | 3,40 | 9,70 | 0,61 | 1084 |

Säärasitusten vaikutusta BluClad-levyn ja orgaanisen Stolit 1,5K pintarappauksen tartuntaan on tutkittu Cape R & D -laboratoriossa keinovanhentamalla ensin rakennetta sääkoestuslaitteessa ja vertaamalla sen jälkeen rappauspinnan tartuntalujuutta vertailukappaleiden tartuntalujuuksiin.

Säärasitus toteutettiin Cape Ltd:n säärasituslaitteistossa siten, että ensin rapattuun levyyn kohdistettiin 25 kosteusrasitusjaksoa, ja sen jälkeen 5 jäädytys-sulatusjaksoa välillä -20 °C - 70 °C. Säärasitetusta sekä vertailurakenteesta leikattiin 600 x 190 mm kaistaleita, joiden rappauspintaan liimattiin alumiiniset T-kappaleet. Rappauspinnan tartuntavetokoe suoritettiin Instron 1122 -koestuslaitteella kiinnittämällä koekappaleet laitteeseen ja vetämällä rappauspinta T-kappaleen avulla irti levystä.

Kokeen tuloksena kirjattiin vaadittu vetävä voima ja murtomekanismi. Kaikki koekappaleet sekä vertailukoekappaleet rikkoontuivat samalla tavalla: murtokohta sijaitsi pohjalevyssä, jolloin levyn pinnasta irtosi pala levymateriaalia rappauksen mukana. Rappauspinnassa tai levyn takapinnassa ei esiintynyt vaurioita. Tartunnan irtoamiseen vaaditut vetokuormat on esitetty taulukossa 6.7.

Taulukko 6.7.

Rapatun BluClad-levyn rappauspinnan tartuntavetokokeen murtokuormat.

| | Koekappaleet | Vertailukappaleet |
|----------------------|--------------|-------------------|
| Murtokuorma (N) | 590 | 800 |
| | 750 | 890 |
| | 700 | 620 |
| | 900 | 810 |
| | 820 | 810 |
| | | 860 |
| Keskiarvo ja hajonta | 752 ± 118 | 798 ± 94 |

Saaduista tuloksista nähdään, että säärasituslaitteistossa läpikäydyt kosteus- ja lämpötilavaihtelut eivät vaikuttaneet epädullisesti levyn ja pintarappauksen väliseen tartuntalujuuteen.

Luvussa 8.2. on esitetty tässä diplomityössä tehty säärasituskoe kokonaiselle rapatulla levyrakenteella korjatulle ja lisälämmöneristetylle seinärakenteelle. Kokeen aikana, jolloin seinäpinnan lämpötila vaihteli välillä $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, rapatussa rakenteessa ei havaittu minkäänlaisia vaurioita.

BluCladin pitkäaikaissääkokeet luonnonolosuhteissa on aloitettu vuosi sitten kolmella eri tutkimusasemalla Saksassa (Baijerissa), Skandinaviassa ja Isossa Britanniassa (Cumbriassa). Tuloksia näistä sääkokeista ei ole vielä tallennettu, mutta vuosien kuluessa tullaan saamaan arvokasta tietoa niin levymateriaalin kuin rappausrakenteenkin pitkäaikaiskestävyydestä.

Laboratoriokokeiden avulla ollaan siis saatu rohkaisevia tuloksia rapatun BluClad-levyrakenteen pitkäaikaiskestävyydestä. Lopullista varmistusta rakenteen kestävydestä ei voida antaa ennen kuin nähdään, miten laboratoriokokeiden tulokset vastaavat luonnonolosuhteissa tehtävän pitkäaikaiskestävyysskoheen arvoja, ja ennen kuin rakenteesta varsinkin saumaratkaisun osalta on saatu tuloksia todellisista rakennetuista referenssikohteista.

6.4.2. ULKONÄÖN PYSYVYYS JA HUOLLETTAVUUS

Rapatun BluClad-levyseinän ulkonäön pysyvyys riippuu ratkaisevasti levysaumarakenteen pitkäaikaikäikäytymisestä. Levysaumojen erottuminen tasaisesta rappauspinnasta on suurin tämän tyyppisen rakenteen ulkonäköön vaikuttava riskitekijä. Hyvin ohuessa pintarappauksessa saattaa saumassa oleva saumateippi ja lasikuituverkko näkyä jo uudessa rappauspinnassa varsinkin kun käytetään rappaukseen ruiskumenetelmää. Ulkonäön kannalta varminta olisi tällaisessa tapauksessa ulottaa lasikuituverkko ja pohjarappaus koko rapattavalle alalle.

Edellä on käsitelty rapatun levysauman käyttäytymistä levynsuuntaisten kuormien vaikutuksen sekä lämpötila- ja kosteusvaihtelujen alaisena. Tehdyssä kuormituskokeessa normaaleilla tasonsuuntaisilla käyttökuormilla ei saumakohdat tulleet näkyville. Käytettäessä saumarakenteessa tartunnan estävää saumateippiä tuli saumakohta näkyväksi yli 10 mm vaakasiirtymällä. Lämpötila- ja kosteusvaihtelujen ei laboratorio-olosuhteissa tehdyissä kokeissa ole havaittu aiheuttavan saumakohdan esilletuloa (luku 8.2). Rakennerratkaisun toimivuuden varmistamiseksi tältä osin on odotettava luonnonolosuhteissa tehtävän vanhennuskokeen tuloksia.

Yleisesti rappauspinnan ulkonäön pysyvyys riippuu käytettävän rappausmateriaalin ominaisuuksista. Rappauksena voidaan käyttää sekä orgaanisia että epäorgaanisia rappauspinnoitteita, joiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan ja eri tuotteiden välillä monella tavalla. Orgaanisten rappauksen ongelmana on ollut joustavuuden huononeminen ja väripigmenttien haalistuminen ajan kuluessa varsinkin tummia sävyjä käytettäessä. Epäorgaanisissa rappauspinnoissa taas väri vaihtelut ovat melko yleisiä. Pinnan likaantuminen riippuu pääasiassa rappauksen karkeusasteesta ja värisävystä sekä ilmasto-olosuhteista. BluClad-levyssä ei ole liima-aineita tai hartsia, jotka usein aiheuttavat pintamateriaalina olevan maalin tai rappauksen likaantumista.

Rappausaineen ja BluClad-levyn on oltava yhteensopivia, jotta julkisivupinnan pitkäaikaiskestävyydelle on edellytykset. Mikrosilikoniemulsiolla pintakäsitellyn levyn ja levyrakenteen yhteensopivuus erilaisten rappausaineiden kanssa on vielä vahvasti tutkimusasteella. Cape Ltd on tutkimuksissaan todennut ainakin saksalaisten Sto:n ja Knauf:n tuotteiden soveltuvan

BluClad:n rappaukseen. Tällä hetkellä tutkitaan monia muita eurooppalaisia ja lähinnä pohjois-eurooppalaisia rappaustuotteita yhdessä BluClad:n kanssa sekä Cape Ltd:n että rappausaineiden valmistajien toimesta. Suomessa ei tällä hetkellä valmisteta levysaumassa käytettäviä kuituvahvisteisia jäykistysrappauksia, eikä pintarappausaineiden soveltuvuutta suoraan mikrosilikonipohjalle ole tutkittu.

BluClad-rakenteen huoltotarve määräytyy pintarappauksen huoltotarpeesta, itse levyä ei huolleta. Pinnan huollettavuus, kuten pestävyys ja maalattavuus, riippuu myös pintamateriaalista. Rappauspintoja voidaan yleensä puhdistaa painepesurilla ja epäorgaanisia rappauksia myös harjaamalla. Epäorgaaniset pinnoitteet tulevat ennenpitkää maalattaviksi, ellei sitten ole käytetty pigmentoitua pintarappausta. Ennen maalausta vanha pinta harjataan puhtaaksi. Orgaanisten rappauksen uudelleenmaalaustarve vaihtelee tuotteesta riippuen, samoin maalattavuus. Yleensä vanhan pinnoitteen päälle voidaan uudelleenmaalata enintään yhden kerran tai sitten vanha pinnoite on poistettava aina ennen uudelleenmaalausta erilaisilla maalinpoistoaineilla.

Mahdollisten mekaanisten vaurioiden korjaaminen itse levystä on mahdollista, mutta varsinaisia ohjeita ei vielä ole olemassa. Vaurion ollessa pienellä alueella kysymykseen tulee esim. vaurion tasoittaminen rappaukseen soveltuvalla korjauslaastilla tai levyn osittainen korvaaminen uudella levypalalla. Näiden toimenpiteiden jälkeen rappauspinta on uusittava vauriokohdasta. Kokonaisen levyn voi myös vaihtaa ja rapata vanhaa seinää vastaavaksi. Korjauskohtien erottuminen vanhasta rappauspinnasta on todennäköistä.

Todellisista korjauskohteista saadut tiedot olisivat ulkonäön pysyvyyden tarkastelussa ensiarvoisen tärkeitä. Tämän vuoksi olisi tarpeellista tutkia koko rakennetta koekohteen avulla, jossa voitaisiin mitata vallitsevia olosuhteita ja seinän ominaisuuksia pitkällä aikavälillä. Samalla olisi luonnollisesti mahdollisuus tutkia myös korjausrakenteen mekaanisia ja rakennusfysikaalisia ominaisuuksia.

6.4.3. BIOLOGINEN KESTÄVYYS

BluCladin biologista kestävyyttä ei ole erikseen tutkittu, mutta levyn raaka-aineiden ja valmistustavan vastatessa Mastercladia ja muita Cape Ltd:n kalsiumsilikaattipohjaisia levytuotteita voidaan olettaa sen biologisen kestävyysasteen olevan samaa luokkaa kuin Mastercladilla. Mastercladin biologista kestävyyttä on selostettu luvussa 5.4.3.

6.5. PALOTURVALLISUUS

BluClad:n paloteknisen arvioinnin on suorittanut Englannissa The Loss Prevention Council standardin BS 476 (osa 11: 1982) mukaisesti. Kokeiden perusteella materiaali kuuluu englantilaisen luokituksen mukaan paloluokkaan 0 (ei palava).

Suomessa lähes vastaava standardi on SFS-ISO 1182:E. Molemmissa menetelmissä koekappaleina käytetään viittä ϕ 45 mm, korkeus 50 mm, pyöreistä levynpalasista kasattua kappaletta. Englantilaisen standardin mukaan koekappaleet säilytetään ennen koetta 23 ± 2 °C lämpötilassa ja 50 ± 10 % suhteellisessa kosteudessa vakiomassan saavuttamiseen asti, kun taas ISO-standardin mukaan koekappaleita säilytetään ennen kokeita 20 - 24 tuntia tilassa, jonka lämpötila on 60 ± 5 °C. Molemmissa menetelmissä koekappale asetetaan pystysuorassa asennossa olevaan uuniin, jonka lämpötila on n. 750 °C. Lämpötilanmuutoksia seurataan termo-

elementeillä, joita englantilaisen standardin mukaisesti sijaitsee uunissa ja kappaleen keskipisteessä ja ISO-standardin mukaan lisäksi kappaleen pinnalla. Molemmissa standardeissa kokeen aikana mitataan koekappaleen liekehtimisaika.

Englannissa tehdyn kokeen tulokset näkyvät taulukossa 6.8. Suomessa rakennustarvike katsotaan palamattomaksi, jos se viidessä kokeessa täyttää seuraavat ehdot:

- kokeissa mitattujen uunin maksimilämpötilan ja loppulämpötilan erotusten keskiarvo ei ylitä 50 °C,
- kokeissa mitattujen koekappaleen pinnan maksimilämpötilan ja loppulämpötilan keskiarvo ei ylitä 50 °C,
- kokeissa mitattujen liekehtimisaikojen keskiarvo ei ylitä 20 s.

Mikäli rakennustarvike ei täytä edellä esitettyjä ehtoja, se katsotaan palavaksi. Lisäksi jos koekappaleiden keskimääräinen painonvähentyminen kokeen aikana on suurempi kuin 50 %, tarvikkeen palamattomuutta on yleensä arvioitava muiden menetelmien avulla.

Taulukko 6.8.

Englannissa tehdyn BluClad:n palamattomuuskokeen tulokset.

| Koe-kappale | Maksimi lämpötila | | Lämpötila lopussa | | Lämpötilan nousu | | Liekehtimisaika (s) | Painonmenetys (%) |
|-------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------|-------------------|
| | Uuni (°C) | Kappale (°C) | Uuni (°C) | Kappale (°C) | Uuni (°C) | Kappale (°C) | | |
| 1 | 802 | 783 | 788 | 712 | 14 | 71 | 0 | 12,5 |
| 2 | 803 | 884 | 801 | 773 | 7 | 111 | 0 | 14,9 |
| 3 | 820 | 810 | 800 | 731 | 20 | 79 | 0 | 16,6 |
| 4 | 820 | 899 | 796 | 771 | 24 | 128 | 0 | 19,5 |
| 5 | 807 | 783 | 792 | 709 | 15 | 74 | 0 | 17,4 |
| k.a. | - | - | - | - | 16 | 93 | 0 | 16,2 |

Jos verrataan suoraan saatuja tuloksia ja Suomessa käytettyjä palamattomuuden ehtoja, nähdään, että BluClad täyttää annetut rajat niiltä osin, kun mittauksia on tehty. Koekappaleen pinnan lämpötilavaihteluja ei ole kokeessa mitattu, mutta esim. Mastercladin tapauksessa muut arvot olivat VTT:n tekemissä kokeissa lähes samat kuin BluClad:lla ja lämpötilaerojen keskiarvo koekappaleen sisällä oli 94 °C. Masterclad:lla lämpötilaero koekappaleen pinnalla oli 23 °C. Tästä ei kuitenkaan voida suoraan päätellä BluClad:n pinnan käyttäytymistä palon aikana, koska BluClad:n pinnan ominaisuuksiin vaikuttaa määräävästi pinnassa oleva mikrosilikoniemulsio.

Koska Suomessa ja Englannissa käytettävät kokeet eroavat toisistaan edellä esitetyn mukaisesti koekappaleiden esikäsittelyn ja osittain mittausten suhteen, tulisi BluClad:n suomalaista palamattomuusluokistusta varten tehdä varmistuskoe suomalaista standardia käyttäen.

Koko julkisivurakenteen käyttäytyminen palon aikana muodostuu eri materiaalien ja rakenteiden yhteistoiminnasta. Pintakerroksen palo-ominaisuudet määräytyvät käytetyn pinnoitteen ominaisuuksista. Suomessa ulkopuolisten pintakerrosten ei tarvitse täyttää luokkavaatimuksia savunmuodostuksen osalta. Palotilanteessa suurimman vaaran aiheuttaa levyjen takana oleva tuuletusrako, jolla on varsinkin korkeissa rakennuksissa paloa edistävä vaikutus. Suomessa ei ole erityisiä määräyksiä palokatkojen tekemisestä tuuletettuun rakenteeseen, mutta Englannissa käytetään luvussa 5.5. esitettyjä palokatkoja korkeissa rakennuksissa.

6.6. PÄÄTELMÄT KELPOISUUDESTA

Kuten aikaisemmin on todettu, julkisivukorjaus päälle rapattavilla BluClad-levyillä on aivan uusi menetelmä, josta ei vielä ole olemassa yhtään referenssikohdetta Suomessa tai muuallakaan. Menetelmän soveltuvuutta on kuitenkin tutkittu edellä selostetuilla sekä luvuissa 7.2. ja 8.2. esitetyillä laboratoriokokeilla. Kokeiden tulokset eivät ole tuoneet esille sellaisia tekijöitä, jotka estäisivät menetelmän käytön julkisivukorjauksissa.

Rapatus BluClad-menetelmän etuna verrattuna muihin levyrakenteisiin korjausmenetelmiin on saumattomuus. Menetelmällä aikaansaatu suurempi yhtenäinen pinta sopii paremmin useimpiin korjattaviin kohteisiin kuin ruutumainen levyypinta. Kuitenkin menetelmällä aikaansaadaan levykorjaukselle tyypillinen kevyt tuuletettu rakenne, joka on käytännössä koettu toimivaksi ratkaisuksi seinän kosteusteknisen toimivuuden kannalta. Levyrakentamisen nopeutta ei menetelmällä saavuteta ylimääräisen rappauspinnan lisäämisen johdosta.

Lämpörappaukseen verrattuna rapattu BluClad-rakenne on kestävämpi iskukuormia vastaan. Tosin lämpörappausmenetelmiäkin on viime aikoina kehitetty paremman iskunkestävyyden saavuttamiseksi. Tuuletettuna rakenteena rapattu BluClad-menetelmä on kosteusteknisesti toimivampi kuin lämpörappaus. Varsinkin solumuovieristeisessä lämpörappauksessa on esiintynyt kosteusongelmia veden kerääntyessä seinärakenteen sisään aiheuttaen rappauspinnan kuplimista.

Muista korjausmenetelmistä rapattavan BluClad-levyrakenteen pintarakenne vastaa lähinnä rapattavia metallikasetteja (RR-julkisivu) ja lämpörappausta solumuovieristettä käyttäen. Molemmissa näistä menetelmistä suurimpana ongelmana voidaan pitää kasettien tai eristelevyjen saumakohtien esilletuloa rapatusta pinnasta ja rappauspinnan halkeilua näissä kohdissa johtuen rappausmateriaalin ja alustan erilaisista pituudenmuutoksista lämpö- ja kosteusvaihtelujen alaisena sekä orgaanisen rappausmateriaalin elastisuuden vähenemisestä ajan kuluessa.

Rapatus BluClad-levyrakenteen levysaumojen suunnittelu on lähtenyt näiden aiemmin saatujen kokemusten pohjalta. Menetelmässä sauman vahvistuksena käytetään lasikuituverkkoa sekä jäykistävää pohjarappausta, ja muodonmuutosaluetta saumassa laajennetaan Tyvec-teipillä, jossa keskellä on rappausten tartunnan estävä kaistale. Tehdyissä tutkimuksissa ei ole kuitenkaan voitu osoittaa saumateipillisen rakenteen paremmuutta ilman saumateippiä tehtyyn rakenteeseen nähden. Sen sijaan saumateippi itse saattaa erottua rapatusta pinnasta ohuilla rappauspaksuuksilla.

Lisätutkimuksia saumateipin tarpeellisuudesta olisi siis tehtävä. Saumarakenteen muodonmuutoskykyä eri rappausmateriaaleilla ja eri lämpötiloissa tulisi tutkia aiemmin mainitulla yksinkertaisella nykityskokeella.

Seuraavaksi menetelmän kelpoisuus tulisi varmistaa käyttämällä korjausrakennetta koe-kohteessa tai kohteissa, jolloin voitaisiin tutkia rapatus levyrakenteen mekaanista ja rakennusfysikaalista toimintaa luonnonolosuhteissa sekä varsinkin rapatus pinnan ulkonäön pysyvyyttä pitkällä aikavälillä.

7. SADETUSKOKEET

7.1. SADETUSKOE I: SAUMALLINEN MASTERSTONE-JULKISIVULEVYRAKENNE

7.1.1. TEHTÄVÄ

Sadetuskokeessa tarkasteltiin julkisivun levykorjaukseen liittyen saumallisen levyverhouksen pysty- ja vaakasaumojen sekä kiinnityskohtien sateenpitävyyttä, julkisivulevyn vedenimua ja veden mahdollista tunkeutumista seinän sisempiin rakenteisiin. Kokeessa selvitettiin:

- Saumallisen levyrakenteen vaaka- ja pystysaumadetaljien sekä kiinnitysratkaisujen sateenpitävyys tarkastelemalla saumojen läpi tulevaa vesimäärää ja vuodon alkamisen ajankohtaa rakenteen yli vallitsevan paine-eron arvoilla 0 Pa, 25 Pa ja 50 Pa sekä asteittain nousevan paineen alaisena.
- Veden imeytyminen julkisivumateriaaliin punnitsemalla rakennetta kokeen aikana
- Veden mahdollinen kulkeutuminen seinän sisempiin rakenteisiin levyjen kiinnityksen välityksellä.

7.1.2. KOERAKENNE

Koerakenteena tutkittiin ensin kahdentyyppistä 1300 x 1300 mm² levyseinää erilaisilla pysty- saumaratkaisuilla. Molemmista koerakennetyypeistä tehtiin 3 rinnakkaiskoekappaletta, yhteensä 6 koerakennetta.

- | | |
|---------------|--|
| Koerakenne I | Masterstone-kalsiumsilikaattilevyseinä, jossa oli yksi pysty- ja vaaka-sauma. 8 mm paksut levyt kiinnitettiin puukehikkoon haponkestävillä kannallisilla 2,5 x 30 mm levynauloilla. Asennusohjeen mukaisesti naulanreiät esiporattiin 2 mm suuremmiksi kuin naulojen halkaisija. Avonaisten pystysaumojen taustamateriaalina oli 40 mm leveä kumikaista (EPDM). Vaakasaumassa käytettiin muovipinnoitetusta pellistä taivutettua tippalistaa. Liite 5. |
| Koerakenne II | Kuten edellinen, mutta avoimien pystysaumojen taustamateriaalina oli metallilista. Liite 6. |

Jokaisen koerakenteen vaakasaumojen (keskisauma ja alasauma) taakse laitettiin koestusnäyte-laudat (22 X 100, pituus 200 mm), jotka punnittiin ennen sadetusta ja sen jälkeen.

Edellä kuvattujen koekappaleiden sadetuksen jälkeen tutkimusta jatkettiin saatujen tulosten perusteella vielä kahdella erityyppisellä rakenteella, jossa saumaratkaisu oli sama ja kiinnitystapaa muuteltiin. Molemmista koerakennetyypeistä tehtiin 3 rinnakkaiskoekappaletta, yhteensä 6 koerakennetta. Myöhemmin käsitelty saumaton koerakenne oli numeroitu koerakenne III:ksi, joten uusien koerakenteiden järjestysnumerot olivat IV ja V.

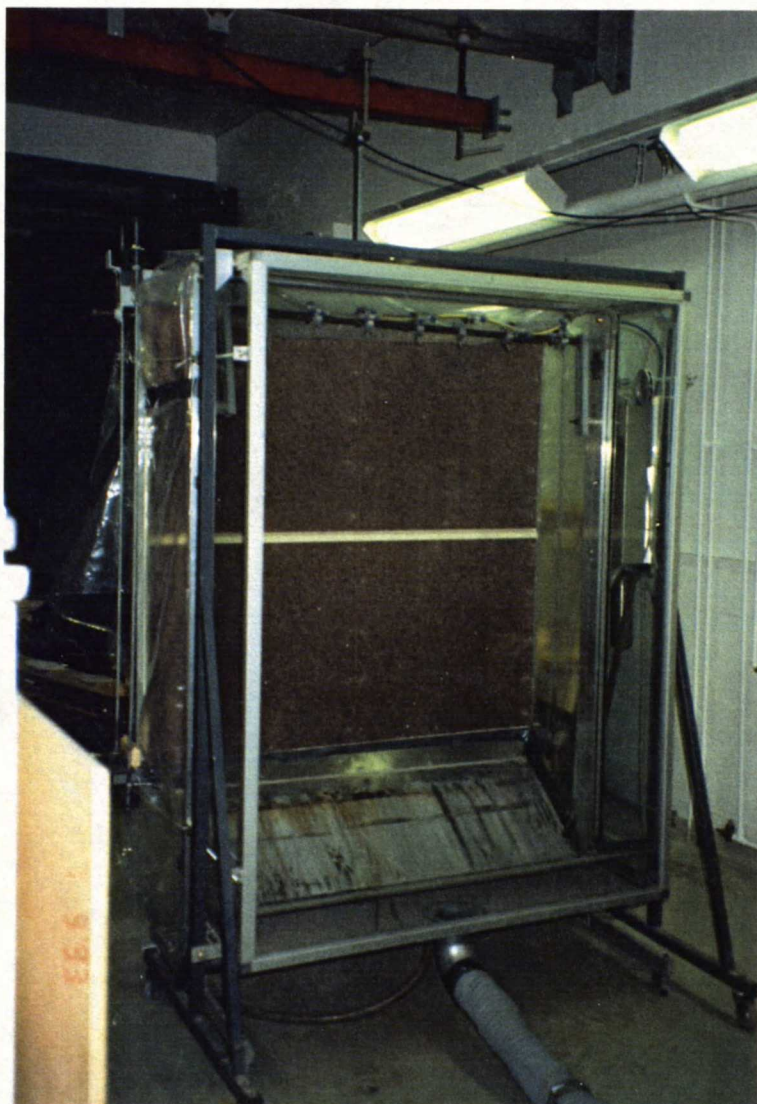
- | | |
|---------------|--|
| Koerakenne IV | Masterstone-kalsiumsilikaattilevyseinä, jossa oli yksi pysty- ja vaaka-sauma. Asennusohjeen mukaisesti 6 mm paksut levyt kiinnitettiin puukehikkoon haponkestävillä kannallisilla 2,5 x 30 mm levynauloilla ilman esiporausta. Avonaisten pystysaumojen taustamateriaalina oli kumikaista (EPDM). Vaakasaumassa käytettiin muovipinnoitetusta pellistä taivutettua tippalistaa. Liite 7. |
|---------------|--|

Koerakenne V

Kuten edellinen, mutta levyn paksuus oli 8 mm ja kiinnitys tapahtui haponkestävillä 4,2 x 32 mm julkisivuruuveilla, joiden kannan alla oli 2,4 mm paksu neopreenieriste halkaisijaltaan 9 mm. Ruuvien kannan halkaisija oli 13 mm. Esiporaus tehtiin 5,5 mm kovametalliterällä, johon oli kiinnitetty 9 mm jyrsin. Jyrsimellä tasoitettiin eristeen alle jäävä alue poistamalla kivirouhe levyn pinnasta. Liite 8.

7.1.3. KOEJÄRJESTELYT

Koelaitteistona käytettiin Teknillisen Korkeakoulun Talonrakennustekniikan laboratorion sadetuslaitteistoa, jolla voidaan säätää seinään kohdistuvaa sateen intensiteettiä ja ulkoista ilmanpainetta. Kokeessa vesimääränä käytettiin 2 l/min ja paine-erona ensin eri rinnakkaiskappaleille 0 Pa, 25 Pa tai 50 Pa ja sitten kaikille asteittain 0, 10, 20, 30, 40 ja 50 Pa. Laitteen suuttimet suunnattiin 30° alaspäin vaakatasosta n. 35 cm etäisyydelle levypinnasta. Sadetus kohdistettiin seinän yläosaan n. 25 cm yläreunasta. Käytetty sadetuslaitteisto on kuvassa 7.1.



Kuva 7.1. Sadetuskokeessa käytetty sadetuslaitteisto.

Kaikilla rakenteilla suoritettiin yksi koesarja, joka sisälsi ensin 30 minuutin sadetusjakson 0 Pa, 25 Pa tai 50 Pa paineilla eri rinnakkaiskappaleilla ja sen jälkeen märkinä sadetuksen asteittain eri paine-eroilla 0-50 Pa, jolloin yhdellä paineella sadetettiin 5 min.

Levyverhouksen sateenpitävyyden tarkastelussa mitattiin seinän sisäpintaa pitkin mahdollisesti valunut vesimäärä. Saumojen käyttäytymistä paineen kasvaessa ja sateen valumista verhouksen sisäpinnalla tarkasteltiin silmämääräisesti sekä valokuvaamalla.

Koeseinä kokonaisuudessaan oli kokeen aikana vaa'assa. Koekappaleen painonmuutokset tallennettiin vahvistimen kautta piirturille. Piirturin osoittama painonmuutos sisälsi myös läpitulleen veden painon, sillä vedenkeräyskouru oli kiinni kappaleen alareunassa. Läpi tullut vesi laskettiin pois ja punnittiin 30 minuutin yhtenäisen sadetusjakson jälkeen sekä kokeen lopussa.

Koerakenteiden I ja II vaakasaumoihin asennetut kosteusnäytelaumat punnittiin koetta ennen sekä sadetuksen jälkeen. Tästä saatiin absoluuttinen vesimäärä näytelaudoissa. Kuivatusta ei tehty, koska näytelaumat olivat suuria verrattuna sauman vaikutusalueeseen. Suhteellisen kosteuden muutos koko kappaleessa olisi ollut hyvin pieni ja tästä saatu tulos olisi antanut väärän kuvan sauman kosteustilasta. Rakennetyypeissä IV ja V ei käytetty kosteusnäytelautoja.

Erilaisten pystysaumaratkaisujen vertailussa (koerakenteet I ja II) lopuksi valittiin sadetetuista kuivista kappaleista kaksi koekappaletta, joista toisessa oli pystysauman taustamateriaalina kumikaista (I C) ja toisessa metallilista (II B). Molempia kappaleita sadetettiin 30 Pa paineessa yhden minuutin ajan. Sadetuksen jälkeen seinärakenne purettiin ja tarkasteltiin silmämääräisesti sekä valokuvaamalla veden läpitulojälkiä levyissä sekä sadetuksen vaikutusta levyjen kuntoon.

Koerakenteet IV ja V purettiin kaikki heti varsinaisen sadetuskokeen jälkeen ja levyjen takapinnat valokuvattiin.

7.1.4. KOETULOKSET

7.1.4.1. LÄPÄISEVÄ VESIMÄÄRÄ JA VEDEN LÄPITULON ALKAMINEN

Koekappaleiden läpäisemät vesimäärät sadetuksen aikana ja vuotokohdat rakenteen takana on esitetty taulukossa 7.1.

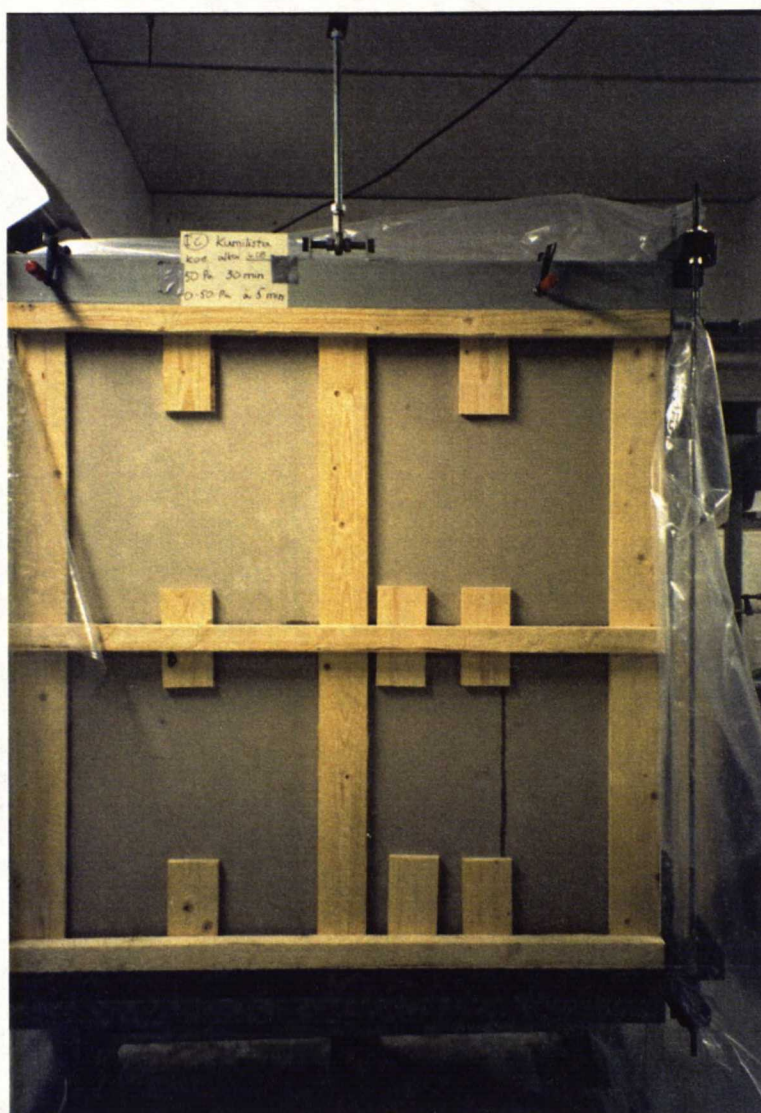
Naulatut levyrakenteet läpäisivät kaikki vettä. Ainoastaan koekappaleen I B tapauksessa läpäisy oli vakiopaineessa niin vähäistä, ettei vesi valunut keräyskouruun asti, vaan imeytyi levyn takapintaan. Naulattujen koekappaleiden I C, II B, ja IV A takapinnat sadetuskokeen jälkeen näkyvät kuvissa 7.2. - 7.4. Eristettyä ruuvia käytettäessä vesi ei millään koekappaleella valunut koekappaleen takapinnalle. Esimerkkinä on koekappaleen V B takapinta sadetuskokeen jälkeen kuvassa 7.5.

Pääosa naulatuista koerakenteista läpitululleesta vedestä valui pystysauman alaosaan vedenkeräyskouruun. Lisäksi vuotokohtia olivat vaakasaumoissa pystykoolausten keskikohdissa olevat tukilaumat. Puurakenteiden peittäessä varsinaiset vuotokohdat oli läpitulon tarkka paikantaminen vaikeaa. Tästä syystä päätettiin jatkaa koesarjojen I ja II tutkimusta sadettamalla valittuja koeseiniä I C ja II B minuutin ajan ja purkamalla rakenne sadetuksen jälkeen. Sarjan IV ja V kaikki koekappaleet purettiin heti varsinaisen sadetuksen jälkeen.

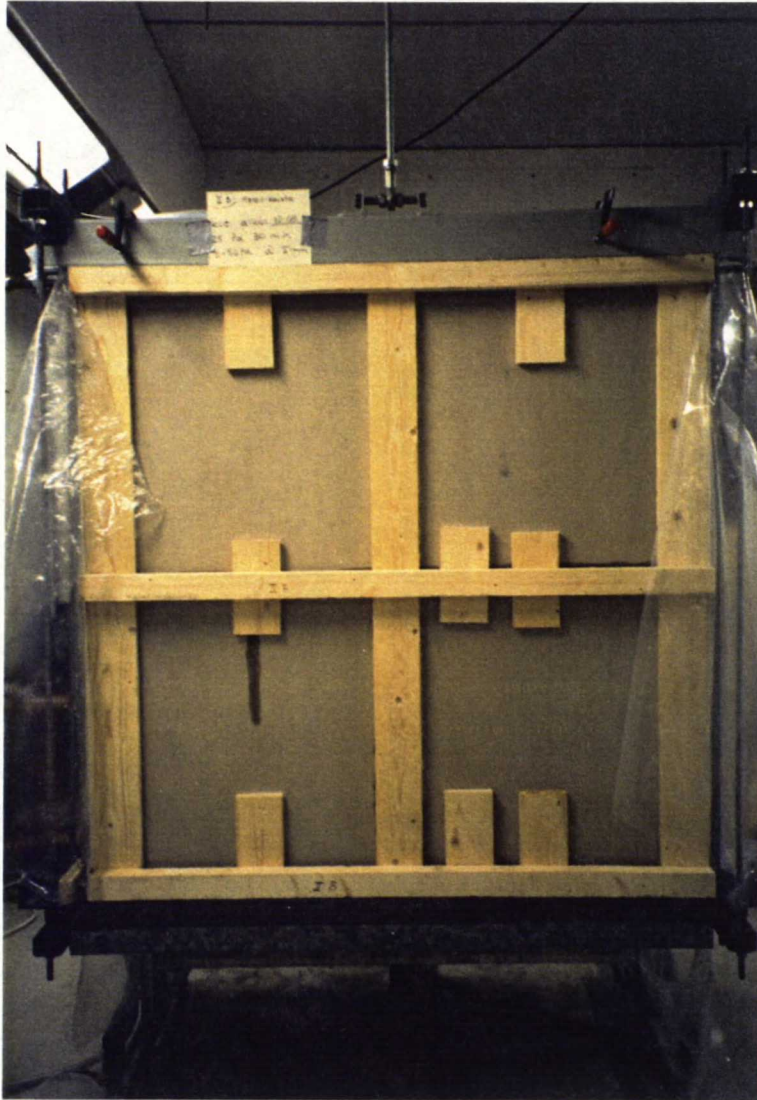
Taulukko 7.1.

Koekappaleiden läpäisemät vesimäärät ja vuotokohdat rakenteen takana sadetuksen aikana.

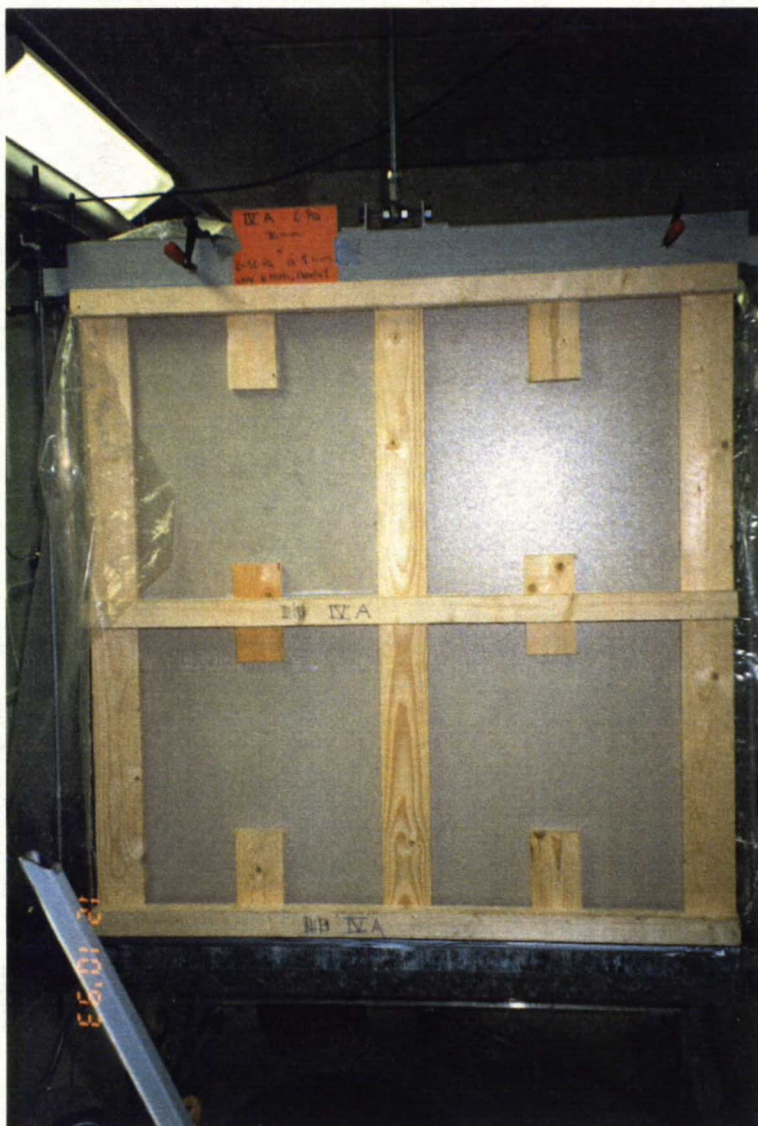
| Koekappale | Vakiopaine , Pa | Läpäissyt vesimäärä vakiopaineen aikana, g | Vuotokohdat | Läpäissyt vesimäärä kasvavan paineen aikana, g | Vuotokohdat |
|------------|--------------------|---|--|--|---|
| I A | 0 | 265 | pystysauma | 670 | alas.tukipuu |
| I B | 25 | 0 | | 190 | pystysauma |
| I C | 50 | 2350 | pystysauma (keskis.tukipuu) | 1600 | pystysauma keskis.tukipuu (muut tukipuut) |
| II A | 0 | 490 | alas.tukipuu pystysauma keskis.tukipuu | 730 | alas.tukipuu pystysauma keskis.tukipuut |
| II B | 25 | 750 | pystysauma | 760 | pystysauma (keskis.tukipuu) |
| II C | 50 | 160 | pystysauma | 250 | pystysauma (alas.tukipuu) (keskis.tukipuut) |
| IV A | 0 | 20 | pystysauma alas.tukipuu | 815 | pystysauma alas.tukipuu |
| IV B | 25 | 250 | pystysauma | 300 | pystysauma |
| IV C | 50 | 1470 | alas.tukipuut | 3130 | alas.tukipuut |
| V A | 0 | 0 | | 0 | |
| V B | 25 | 0 | | 0 | |
| V C | 50 | 0 | | 0 | |



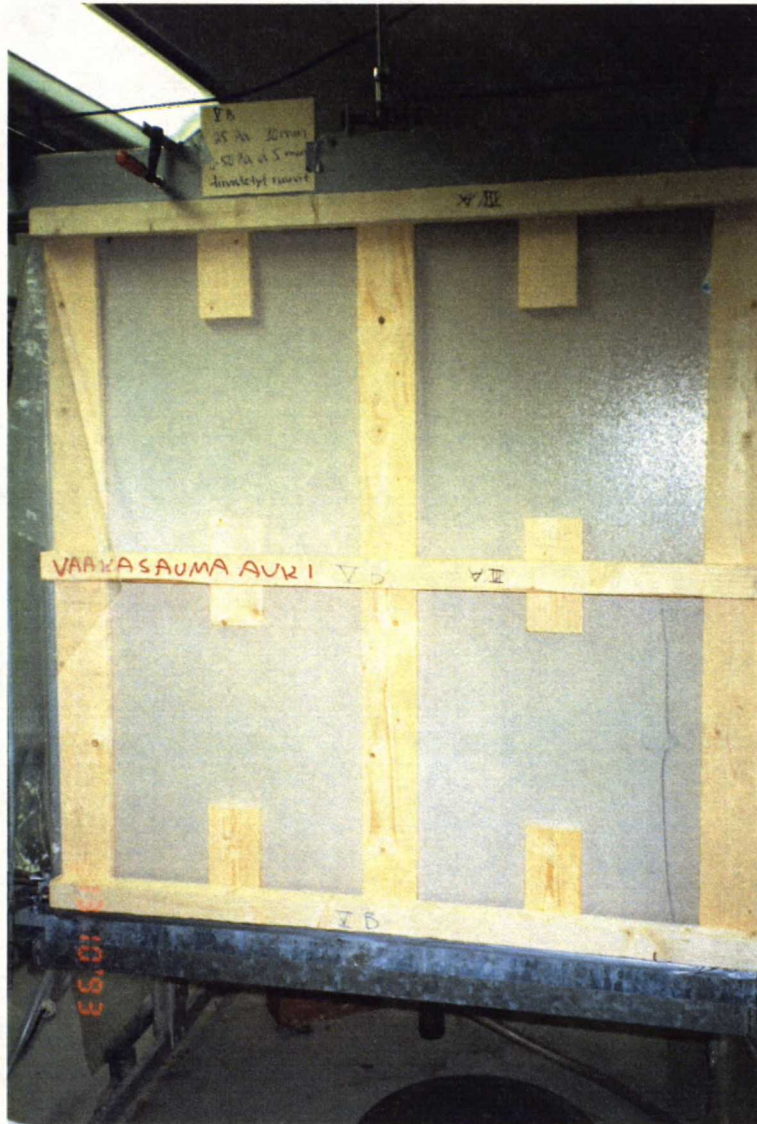
Kuva 7.2. Koekappaleen I C takapinta sadetuskokeen jälkeen.



Kuva 7.3. Koekappaleen II B takapinta sadetuskokeen jälkeen.



Kuva 7.4. Koekappaleen IV A takapinta sadetuskokeen jälkeen.



Kuva 7.5. Koekappaleen V B takapinta sadetuskokeen jälkeen.

Liitteessä 9 on esitetty saumallisten levyrakenteiden läpi tulleen veden määrä vakioaineessa ja asteittain nousevan paineen alaisena. Kuvista voidaan havaita, ettei pystysauman taustamateriaali sanottavasti vaikuttanut veden läpituloon. Verrattaessa sarjan I ja II koekappaleiden vedenläpäisevyyksiä nähdään, että koekappaleen I C läpäisy oli huomattavasti muita suurempi (yhteensä 3950 g koko sadetuksen aikana), mutta kahdella alemmalla paineella sadetettaessa I-sarjan koekappaleet antoivat pienemmät vedenläpäisyn arvot kuin vastaavat II-sarjan koekappaleet (I A 935 g, I B 190 g, II A 1220 g ja II B 1510 g).

Tuloksista huomataan myös, että koerakenteilla I ja II ei paineen suuruus sadetuksen aikana ollut ratkaiseva tekijä läpitulleen veden määrään. Vakioaineessa I-koekappaleilla pienin läpäisyarvo saatiin 25 Pa paineessa (0 g) ja suurin 50 Pa paineessa (2350 g). II-koekappaleilla taas pienin arvo saatiin 50 Pa paineessa (160 g) ja suurin arvo vastaavasti 25 Pa paineessa (750 g). Asteittain nousevan paineen aikana veden läpitulon ei sanottavasti huomattu kasvavan paineen noustessa. Tämä voitiin myös lukea piirturin painonmuutoskäyrästä, jossa painonkasvun kulmakerroin pysyi kutakuinkin vakiona paineen kasvaessa (painonmuutoskäyrä sisälsi myös läpitulleen veden määrän).

Sen sijaan nähdään, että koerakennesarjoissa I ja II eri koekappaleiden järjestys läpäisevyyden suhteen pysyi samana erilaisilla yhtä kauan kestäville sadetuksilla. Tästä sekä vuotokohtien sijainnista voidaan päätellä, että vesi pääsi rakenteen läpi pääasiassa naulaliitoksista. Levyjen asennusohjeiden mukaisesti naulanreiät tehtiin 2 mm suuremmiksi kuin naulojen halkaisija. 2 mm:n ohje on annettu, jotta liitos kestäisi levyjen lämpö- ja kosteusliikkeet. Naulauksessa käytettiin kannallisia levynauvoja. Naulan kannan ja rosoisen kivipintaisen rakennuslevyn väliin jäi naulauskohdasta ja naulaustyöstä riippuen vaihtelevan suuruinen rako, joka jatkui naulan varren ja reiän välissä levyn taakse asti. Naulauskohtia ei tiivistetty, koska sitä ei yleensä tehdä myöskään todellisessa seinärakenteessa. Koekappaleiden vuotaminen riippui siis ensisijaisesti naulauskohtien rakojen leveyksistä, ja tämä arvo vaihteli satunnaisesti eri naulojen ja koekappaleiden välillä. Veden tunkeutuminen naulanreiän läpi tapahtui siis pääasiassa kapillaarisesti ja ilmavirran mukana (katso kuva 3.8., sateen tunkeutuminen seinärakenteeseen).

I-sarjan koekappaleissa käytetty EPDM-kumikaista muodostaa teoriassa vesikourun pystysauman taakse. Voidaan olettaa, että osa pystysauman alaosasta vedenkeräyskouruun valuneesta vedestä on kulkeutunut tätä kautta. Kuitenkaan kumikaistalla saadut läpäisyarvot eivät ole järjestelmällisesti metallilistalla saatuja arvoja suurempia, joten ainakaan kovin suuria määriä ei näin kulkeudu rakenteen läpi.

Koekappaleilla IV läpitulo näytti olevan yhteydessä tasaisen paineen suuruuteen siten, että mitä suurempi paine oli, sitä enemmän vettä pääsi rakenteen läpi. Kasvavalla paineella sadetettaessa vedentulo kasvoi paineen noustessa tiettyyn arvoon, jossa piirturin painonmuutoskäyrä teki mutkan ja käyrän kulmakerroin kasvoi. Tosin eri koekappaleilla tämä paine oli erisuuri. Kokonaisuudessaan vedentulo oli yhtä runsasta kuin sarjan I ja II koekappaleilla, mutta tunkeutumistapa oli erilainen. Kapillaarisen imun lisäksi paine-ero vaikutti veden tunkeutumiseen, kun taas rakojen ollessa pieniä ei ilmavirta vaikuttanut läpäisyyn kuten esiporatuissa naulanrei'issä (katso kuva 3.X., sateen tunkeutuminen seinärakenteeseen).

Sarjan V koekappaleissa ruuvien tiivistys esti veden tunkeutumisen kiinnitysrakojen kautta, ja saatiin hyvin vettä pitävä rakenne. Tämä rakenne osoitti myös sen, ettei pystysaumassa olevan EPDM-kumikaistan kautta kulkeudu sanottavia määriä vettä levyseinän taakse.

7.1.4.2. KOEKAPPALEESSA OLEVA VESIMÄÄRÄ

Seinäarakenteen painonmuutokset mitattiin sadetuksen aikana. Vähentämällä piirturin antamasta painokäyrästä läpimenneen veden paino saadaan rakenteeseen jääneen veden määrä arvioitua.

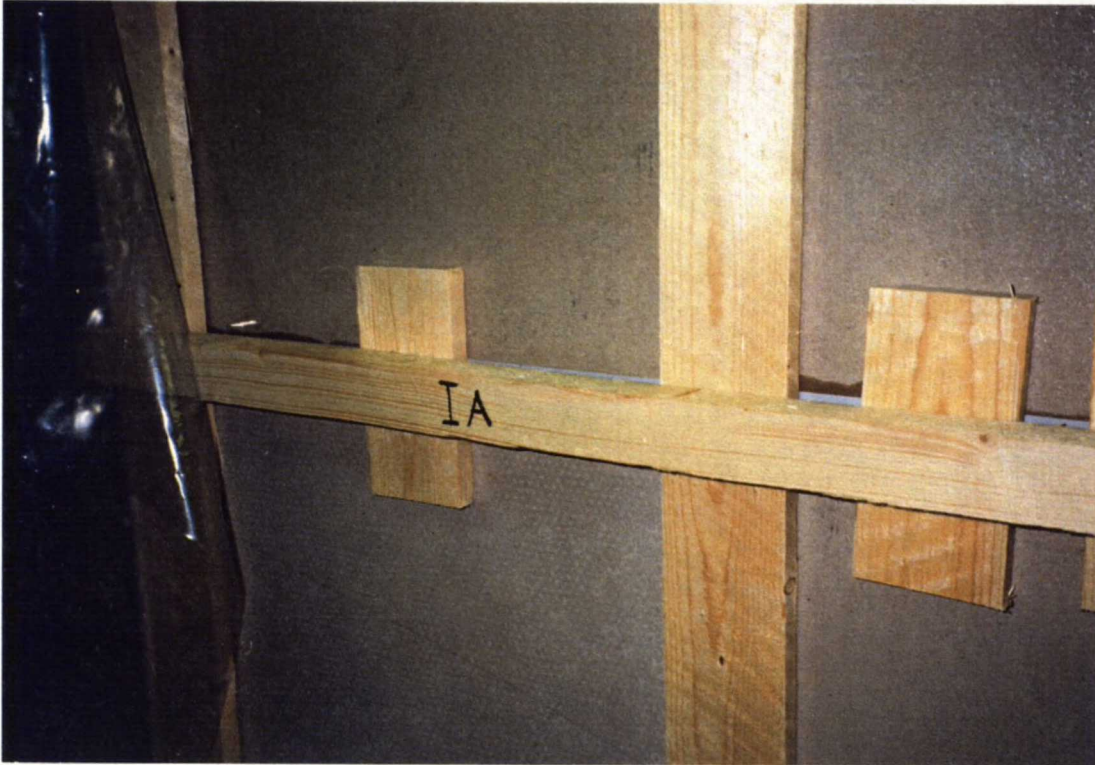
Liitteessä 10 on esitetty koekappaleissa olevan veden määrä sadetuksen aikana. Sadetuksen ensimmäisen viiden minuutin aikana seinäarakenteen paino kasvoi pinnan kastuessa. Tämä näkyy kaikkien koekappaleiden painonmuutoskäyrässä. Sadetuksen jatkuessa pinta kastui vielä jonkin verran lisää yhtenäisen märän alueen kasvaessa. Asteittain nousevalla paineella oli sadetuksen alussa kivirouhepinnat valmiiksi märkiä, mutta irtovesi oli jo ehtinyt valua pois. Painokäyrissä voidaan nähdä uusi hieman pienempi nousu ensimmäisen viiden minuutin aikana pintaan jäävän veden vaikutuksesta.

Painonnousun suuruus eri kappaleiden välillä vaihteli paljon. Sarjan I ja II koekappaleilla erot painonnousuissa olivat maksimissaan 1,05 kg. Tämä johtunee siitä, että koetta varten saadut levyt olivat erivärisiä ja eri kivilaaduilla päällystettyjä. Kivilaatujen vedenimuominaisuudet vaihtelevat huokoisuudesta riippuen. Kivimateriaalina rouhepinnassa on käytetty sekä suomalaisia että ulkomaisia kivilaatuja. Sarjan IV levyt olivat kaikki keskenään samanlaisia, samoin sarjassa V. Tasaisella paineella sadetettaessa painonmuutosten hajonta oli jonkin verran pienempi kuin koekappaleilla I ja II, maksimissaan 0,5 kg, mutta eri paineiden vaikutus imeytyneeseen vesimäärään jäi tässäkin tapauksessa epäselväksi.

Julkisivulevyyn imeytynyt sekä saumoissa ja naulanrei'issä oleva vesimäärä oli hyvin pieni verrattuna kivirouhepinnalle sitoutuneeseen veteen. Tätä vesimäärää yhteensä kuvaa osa viiden minuutin sadetuksen jälkeen tapahtuneesta painonnoususta, ja määräksi voidaan painonnousukäyrästä arvioida 0 - 200 g. Tosin joissain tapauksissa koekappaleen paino jopa laski sadetuksen edetessä. Imeytymistä tapahtui levyjen reunoista ja takapinnasta paikoissa, joissa vettä esiintyi, eli avonaisessa pystysaumassa ja vaakasaumassa saumalistan päällä, naulanrei'issä sekä valumissa levyn takapinnalla. Saumalistan päältä vaakasauman yläpuolisiin levyihin imeytyvä vesimäärä ei vaihdellut kovinkaan paljon eri koekappaleiden välillä sarjassa I ja II. Imeytymiskorkeus oli keskimäärin 25-35 mm levyn alareunasta eli 5-15 mm saumalistan takareunan yli kuvan 7.6. mukaisesti. Sarjan IV ja V koekappaleet olivat pinnoitettuja myös levyreunoistaan, jolloin imeytyminen vaakasaumalistan päältä oli vähäisempää. Sadetuksessa vain koekappaleella V C imukorkeus yletyi vaakasaumalistan reunan yläpuolelle.

Masterstone-levyyn imeytyneen vesimäärän arvioimiseksi suoritettiin yksinkertainen vedenimukoe, jossa 93 x 121 mm levykappale asetettiin pystyyn tarjottimelle, jossa oli vettä sen verran, että levyreuna saattoi imeä vettä itseensä. Imevä reuna oli sahaamaton, mutta tehtaan jäljiltä puutteellisesti pinnoitettu. Koe kesti 1 tunnin. Puolen tunnin jälkeen imukorkeus oli keskimäärin 18 mm ja tunnin jälkeen keskimäärin 21 mm, joten imeytyminen oli hidastunut ratkaisevasti viimeisen puolen tunnin aikana. Saadut arvot olivat pienempiä kuin sadetuskappaleiden imukorkeudet johtuen sadetuskokeesta olleen vaakasaumalistan ja levyn takapinnan välisen raon kapillaarisesta vaikutuksesta.

Tunnin vedenimukokeen jälkeen kappaleen paino oli noussut 3 g, josta vähintään 1 g aiheutui levyn etupinnan kivirouheeseen imeytyneestä vedestä. Takapinnalle imeytyneen veden määrä maksimissaan oli siis 0,022 g/mmh levyn alareunan pituudella.



Kuva 7.6. Vesi imeytyy vaakasaumassa saumalistan päällä olevaan levyyn. Koekappale I A.

7.1.4.3. VEDEN KULKEUTUMINEN RAKENTEESSA

Sarjan I ja II koerakenteissa levyjen takana vaakasaumoissa sijaitsevien kosteusnäytelautojen kastuminen koko sadetusjakson aikana on esitetty taulukossa 7.2. Kastuminen on mitattu veden absoluuttisena painona.

Taulukko 7.2. Kosteusnäytelautojen kastuminen koko sadetusjakson aikana.

| Koekappale | Sadetuksen aikana imeytynyt vesimäärä, g tai ml | |
|-------------------|---|----------|
| | keskisauma | alasauma |
| I A | 0,3 | 4,2 |
| I B | 0,4 | 5,4 |
| I C | 0,5 | 3,5 |
| II A | 0,1 | 0,1 |
| II B | 0,4 | 0,1 |
| II C | 0,3 | 2,3 |
| keskiarvo I ja II | 0,3 | 2,6 |

Keskisaumassa olleen näytelaudan kosteusrasitus avosaumaisessa rakenteessa syntyi vaakasauman saumalistan päältä levyyn imeytyneestä vedestä, saumasta tulevan ilmavirran mukanaan tuomasta kosteudesta sekä pystysaumasta vaakasaumarakenteen kautta kulkeutuneesta vesimäärästä. Näytelaudan kokoisessa puukappaleessa kastumisesta aiheutuva suhteellisen kosteuden muutos oli maksimissaan noin 0,3 %. Vaikka näytelauta oli saman kokoinen kuin vaakasauma-

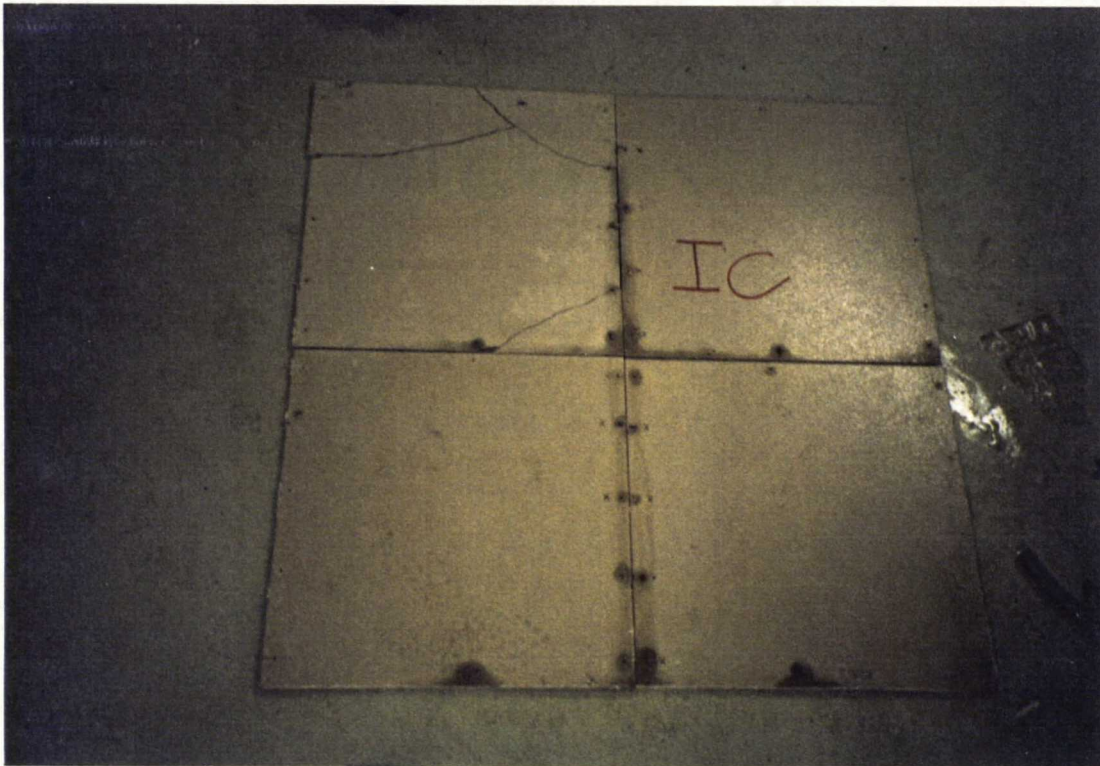
saumassa oleva tukilauta, ei näytelaudan kastuminen vastaa tukipuun kastumista, koska tukipuussa oleva levyn naulakiinnitys aiheuttaa suuremman kosteusrasituksen kuin näytelaudassa.

Alasaumassa ollut näytelauta oli alareunastaan kiinni sadetuslaitteiston raamissa, jonka päällä rakenteesta läpi mennyt vesi seiso i ennen valumistaan vedenkeräyskouruun. Tapauksissa, joissa läpivuotanut vesi tapasi näytelaudan sahapintaisen alareunan (muut koekappaleet paitsi II A ja II B), vesi pääsi vapaasti imeytymään näytelautaan. Kostuminen aiheutui siis koejärjestelyistä, eikä tuloksia voida analysoida rakenteen kannalta.

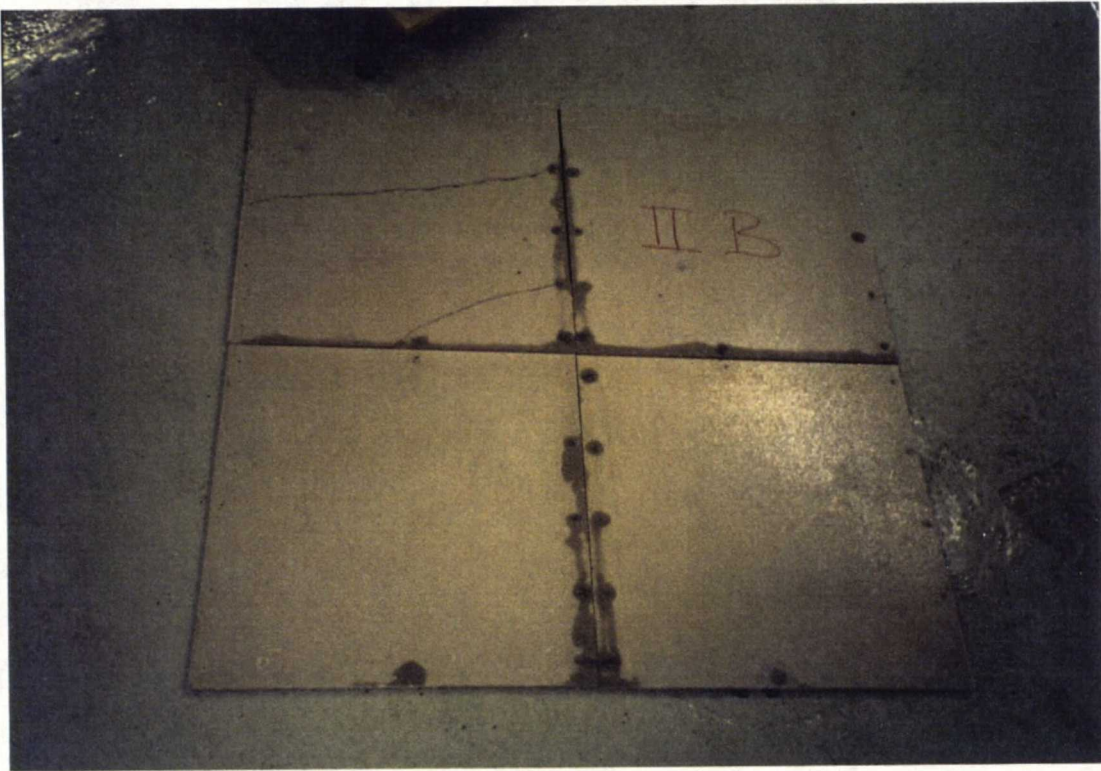
Läpivuotanut vesi kulkeutui rakenteessa pääasiassa levyn takapinnassa sekä pystysaumoissa levyn ja pystykoolauksen välissä. Vaakasaumojen tukipuista vesi valui levyn takapintaa pitkin alemman tukipuun päälle ja siitä tukipuun molemmin puolin. Yhdessä tapauksessa, tukipuun alareunan sahauspinnan ollessa vino, vesi putosi tipoittain tukipuun ulommasta reunasta. Todellisessa rakenteessa vesi kulkeutuisi tuulensuojalevyn pinnalle.

7.1.4.4. VUOTOKOHDAT RAKENTEEN PURKAMISEN PERUSTEELLA

Sarjojen I ja II koekappaleiden vuotokohtien paikantamiseksi sadetettiin kahta koekappaletta, I C ja II B, minuutin ajan 30 Pa paineessa. Sadetuksen jälkeen purettujen levyjen takapinnat näkyvät kuvissa 7.7. ja 7.8.



Kuva 7.7. Koekappaleen I C takapinta 1 minuutin sadetuksen jälkeen. Sadetuspaine 30 Pa.

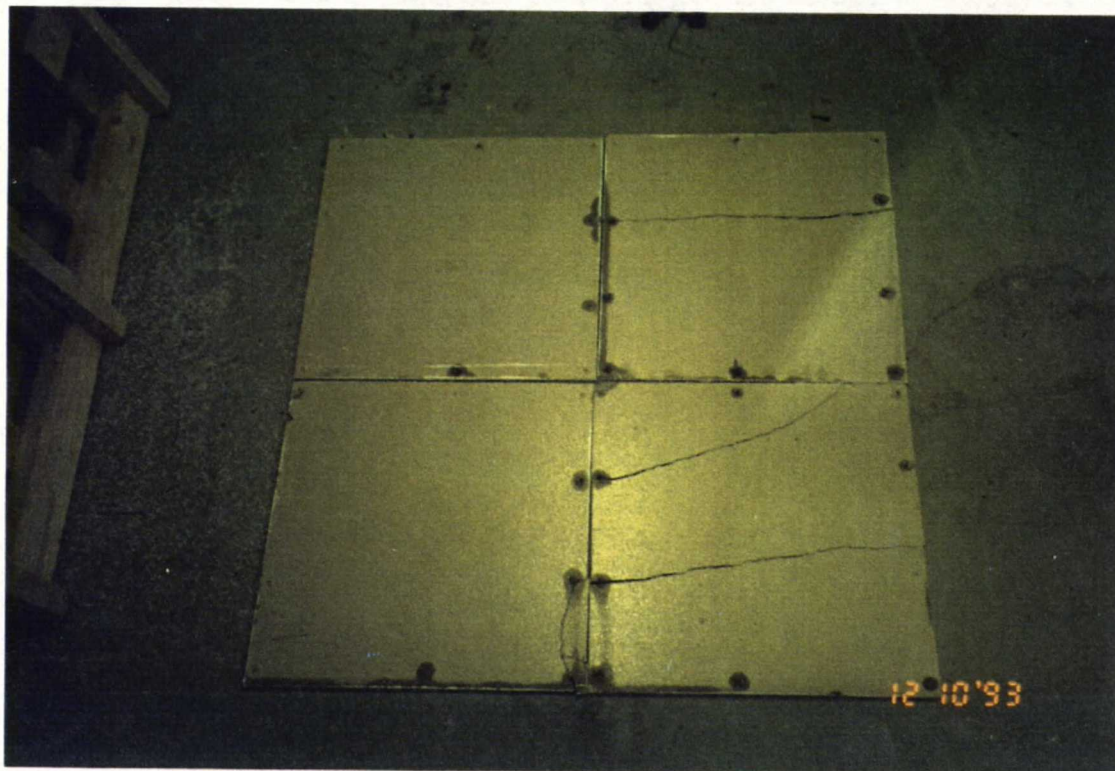


Kuva 7.8. Koekappaleen II B takapinta 1 minuutin sadetuksen jälkeen. Sadetusaine 30 Pa.

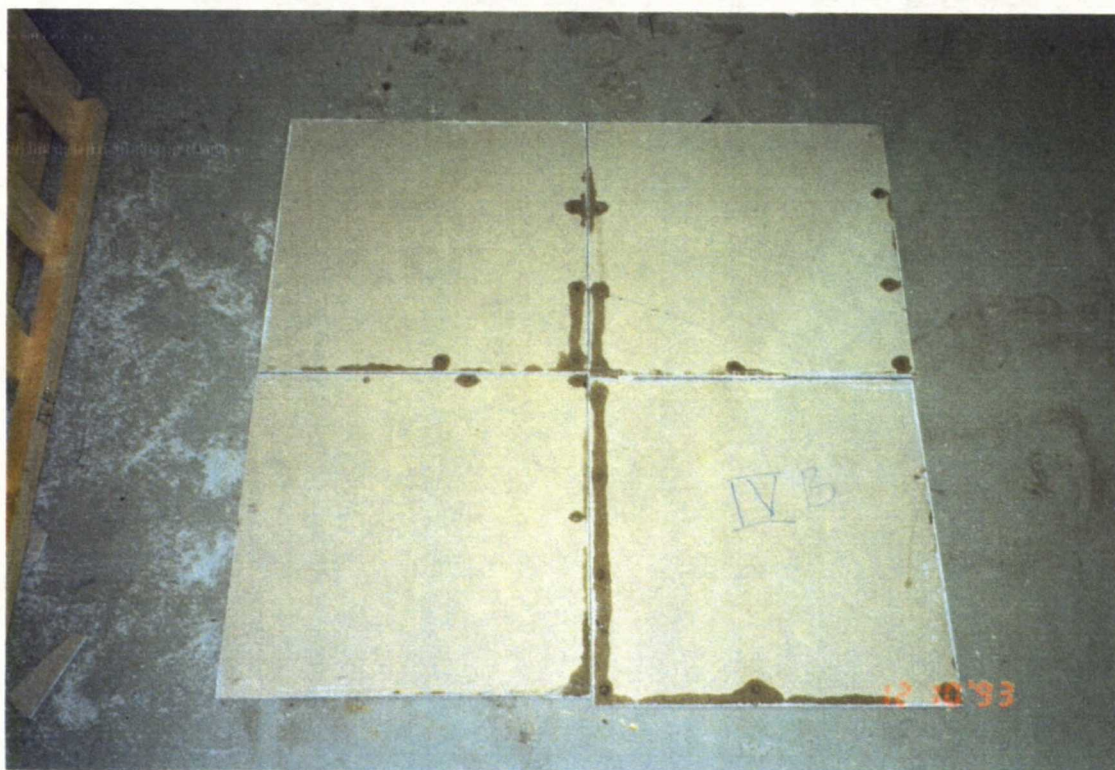
Kuvista nähdään, että pääasialliset vuotokohdat olivat naulanreiät. Koekappaleessa I C varsinaisen sadetuksen aikana läpimennyt vesi havaittiin vasta, kun se tuli esiin pystysauman alapäästä sekä tukipuiden alta (kuva 7.2.). Tässä kuvassa valumajäljet tukipuiden takana näkyvät vielä haaleina varjoina (varsinaisesta sadetuksesta kulunut noin yksi vuorokausi). Pystysaumassa ollut EPDM-kumikaista ei näytä olleen syynä veden läpimeno. Toisaalta osa pystysauman nauloista on naulattu kumikaistan läpi (pienellä mustalla rastilla merkityt reiät), eikä se ole estänyt vedentuloa kyseisistä naulanrei'istä. Vaaka- ja pystysauman risteyksessä kumikaista jatkui yhtenäisenä vaakasaumalistan takana. Vesi ei kuitenkaan ole jatkanut matkaansa pystysaumassa vaakasauman ohi, joten oletettavasti asennusvaiheessa vaakasaumalista on puristunut niin tiukasti kumikaistaa vasten, että vesi jää vaakasaumaan. Vaakasaumassa näkyy veden imeytyminen ylempiin levyihin.

Koekappaleen II B varsinaisessa sadetuksessa vesi vuosi pystysauman alaosaan ja vasemman vaakatuokipuun alta (kuva 7.3.). Puretussa rakenteesta kuvassa 7.8. näkyy selvästi naulanreikien vuotaminen. Ylempien levyjen välissä on myös pystysauman metallilista vuotanut jonkun verran, sillä märän alueen ylin kohta on naulanreikien yläpuolella. Naulaus on tapahtunut pääasiassa metallilistan läpi. Veden kulku pystysaumassa on päättynyt vaakasauman kohdalla, jossa metallilista jatkui yhtenäisenä vaakasaumalistan takana. Vaakasaumassa näkyy veden imeytyminen ylempiin levyihin.

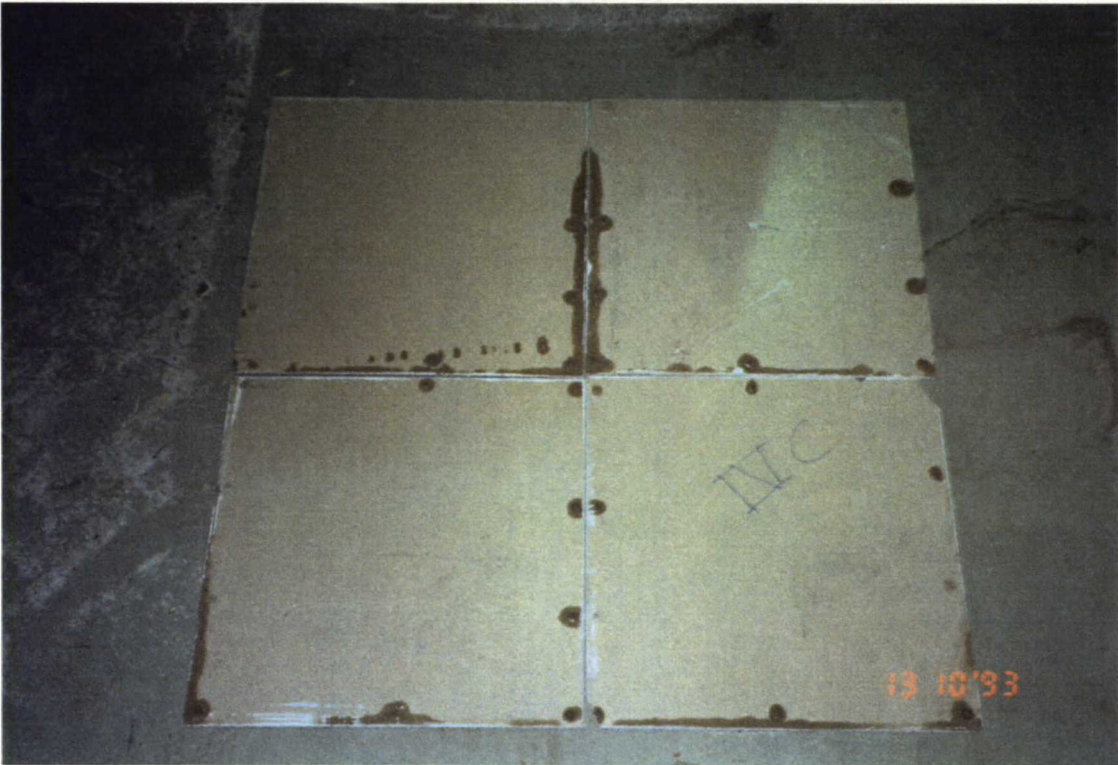
IV ja V koekappaleet purettiin heti varsinaisen sadetuksen jälkeen, jolloin niitä oli sadetettu yhteensä tunnin ajan. Purettujen levyjen takapinnat näkyvät kuvissa 7.9. - 7.14. Kuvia ei voi suoraan verrata koekappaleiden I C ja II B purkamisen jälkeen otettuihin kuviin, koska koekappaleita I C ja II B sadetettiin purkua varten erikseen vain yhden minuutin ajan.



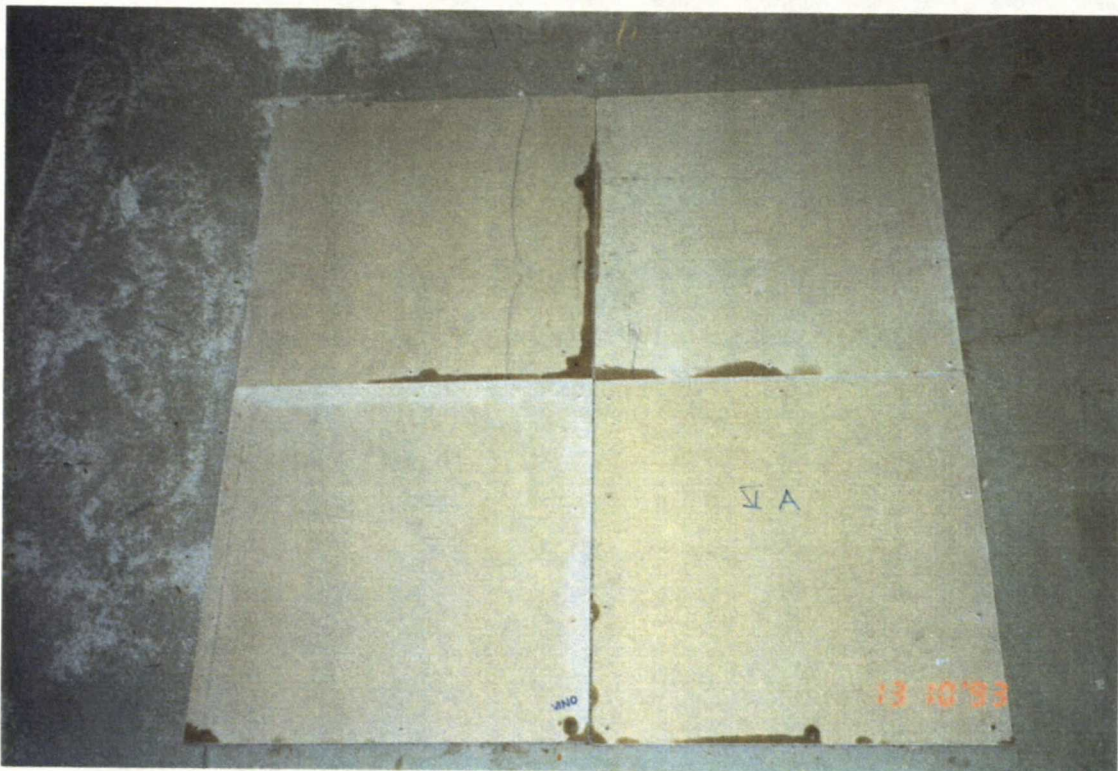
Kuva 7.9. Koekappaleen IV A takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 0 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min.



Kuva 7.10. Koekappaleen IV B takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 25 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min.



Kuva 7.11. Koekappaleen IV C takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 50 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min. Märkä pisteviiva vasemman ylälevyn alaosassa on syntynyt purkuvaiheessa, kun toisen levyn reuna osui siihen.



Kuva 7.12. Koekappaleen V A takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 0 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min.



Kuva 7.13. Koekappaleen V B takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 25 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min.



Kuva 7.14. Koekappaleen V C takapinta varsinaisen sadetuskokeen jälkeen. Sadetuspaineet 50 Pa 30 min ja 0 - 50 Pa à 5 min. Vasemman ylälevyn yläreunassa vesi on valunut koelaitteeseen kuuluvan muovin pinnalta koekappaleen yläreunassa olleen aukon kautta levyn takapinnalle.

Sarjan IV koekappaleet vuosivat pääasiassa naulanrei'istä. Pystysauma on myös osittain märkä, mutta sitä kautta läpi päässyt vesimäärä oli niin pieni, ettei se valunut kouruun asti. Sadetuskokeen aikana vesi valui kouruun koekappaleen IV A pystysauman alaosaan sekä kuvassa vasemmanpuoleisesta alatukipuusta. Koekappaleen IV B valumakohta oli pystysauman alaosa ja koekappaleen IV C alatukipuut. Ylälevyjen osalta pystysauman alueella valunut vesi on jälleen pysähtynyt vaakasauman risteyksessä. Veden imeytyminen ylälevyihin vaakasaumalistan päältä on ollut vähäisempää kuin I ja II-sarjojen koekappaleilla, koska myös levyjen reunat oli pinnoitettu kauttaaltaan.

Koekappaleilla V A, V B ja V C vettä ei valunut kouruun. Rakenne ei kuitenkaan ollut täysin tiivis, vaan levyjen takapinnat kastuivat jonkin verran pystysauman ja yksittäisten ruuvien kohdalta. Vesi imeytyi myös vaakasaumoista ylälevyihin. Kokonaisuudessaan tiivistetyillä ruuveilla toteutetut rakenteet olivat siis huomattavasti tiiviimpiä kuin naulatut koeseinät.

7.1.5. SAATUJEN TULOSTEN ARVIOINTI

Tutkitut esiporaamalla naulatut rakenneratkaisut eivät olleet vesitiiviitä. Vesivuotojen määrä sadetuskokeen tasaisen paineen aikana oli 0 - 2350 g keskiarvon ollessa 670 g. Muuttuvan paineen aikana vesivuotojen määrät olivat 190 - 1600 g, ja keskiarvo oli 700 g. Veden läpikäisy rakenteesta tapahtui julkisivulevyissä olevien naulanreikien kautta. Kyseisiä vesivuotoja ei tuuletusraoilliseen rakenteeseen voida sallia, joten kiinnitysmenetelmä ei sovellu julkisivulevyrakenteeseen.

Asennusohjeen mukaan 6 mm levyt voidaan naulata ilman esiporausta, ja näin tehtiin sarjan IV koekappaleiden tapauksessa. Näissä esiporaamattomissa rakenteissa vesivuodot olivat kuitenkin samaa luokkaa kuin esiporatuissakin koekappaleissa, tasaisella paineella määrät olivat 20 - 1470 g keskiarvon ollessa 580 g, ja muuttuvalla paineella 300 - 3130 g, keskiarvo 1415 g.

Levyjen naulakiinnitystä tulisi kehittää siten, ettei kiinnityskohtaan jää yhtenäistä reittiä, jota pitkin vesi voi tunkeutua sisemmälle rakenteeseen. Käytännön vaihtoehtoja ovat kumikaista levyn ja puukoolauksen välissä sekä tiiviste naulan kannan alla. Sadetuskokeessa kuitenkin levyn ja puukoolauksen välissä ollut EPDM-kumikaista ei estänyt veden pääsyä rakenteeseen niissä naulauskohdissa, joissa naulaus oli tapahtunut kumin läpi. Ratkaisun toimivuutta tulisi tutkia huolellisesti eri materiaaleilla ja materiaalipaksuuksilla. Naulan kannan alla olevan eristeen vaikutus jäisi luultavasti lyhytaikaiseksi, koska nauloilla on taipumus ajan kuluessa pumpautua ulospäin puusta, jolloin tiivisteiden vaikutus loppuisi.

Tiivistetty ruuvikiinnitys yhdistettynä esiporaukseen ja pintakivien poistoon eristeen alueella osoittautui huomattavasti naulakiinnitystä paremmaksi vaihtoehdoksi. Joistakin kiinnityskohdista imeytyi kosteutta levyyn ruuvien kohdalla, mutta läpimenneen veden määräksi kaikilla kappaleilla saatiin 0 g.

Sadetuskokeen perusteella eristetty ruuvikiinnitysratkaisu soveltuu hyvin kivirouhepintaisten julkisivulevyjen kiinnitykseen. Ongelmaksi saattaa muodostua eristemateriaalin pitkäaikaiskestävyys. Materiaalina on käytetty neopreenia ja EPDM-kumia, joista EPDM-kumia pidetään materiaalitutkimuksien perusteella kestävämpänä vaihtoehtona. Julkisivulevyjen kiinnitykseen sopivat eristetyt ruuvit ovat suhteellisen kalliita ja ruuvien iso kanta (yli 10 mm) näkyy levy-

pinnassa. Kannan muotoilulla ja maalauksella voidaan vaikuttaa ratkaisevasti levypinnan ulkonäköön.

Ruuvireikien yhdistettyyn esiporaukseen ja pinnan tasoitukseen tarvitaan kovametallinen erikoisporanterä, jollaista sopivankokoista ei kokeeseen mennessä löytynyt tehdasvalmisteisena. Samantyyppisiä teriä käytetään mm. lasin, kiven ja metallien työstössä. Porassa tulee olla syvyydensäädin, jotta pinnan tasoituksessa ei mennä levyateriaaliin asti. Normaali ohuella syvyydensäätimellä varustettu pora ei kuitenkaan ole kovin hyvä, koska kivirouhepinnan epätasaisuudesta johtuen syvyys kuitenkin vaihtelee. Parasta olisi porata levyt valmiiksi jo tehtaalla.

Pystysauman materiaaliveitsoehtoina kokeillut EPDM-kumilista ja muovipinnoitettu metallilista eivät aiheuttaneet merkittäviä vesivuotoja rakenteeseen. Varsinkin EPDM-kumilistaa on usein käytetty myös kiinnityskohtien vesieristykseen levyn takana. Tähän tarkoitukseen se ei näyttänyt soveltuvan. Vaakasaumalista toimi hyvin veden läpipääsyn estäjänä. Kokeessa käytetty vaakasaumalista oli tehdasvalmisteinen tuotannossa oleva profiili. Listan mittasuhteet olivat hyvät: riittävän pitkä tippanokka tarpeeksi etäällä alemman levyn pinnasta. Vaakasaumalistaa todelliseen rakenteeseen valittaessa nämä ominaisuudet on myös oltava olemassa, jotta lista toimisi toivotulla tavalla.

Avosaumaisessa levyrakenteessa kalsiumsilikaattilevyt imevät vettä levyn sivuista ja alareunasta vaakasaumalistan päältä. Vedenimukokeessa alareunasta levyn takapintaan imeytynyt vesimäärä oli maksimissaan 0,022 g/mm tunnin aikana. Jos tarkastellaan todellista rakennetta esim. levykoolla 1200 x 2500 mm, julkisivulevyjen takapintaan alareunasta ja pystysaumoista imeytynyt vastaava vesimäärä olisi 45,5 g/m² tunnin kestävän sateen aikana.

Luvussa 5.3.2. tarkasteltiin 8,4 m korkean tuuletusraon kosteudenpoistokykyä, ja seinärakenteessa, johon rakennuksen sisältä siirtyy kosteutta vain diffuusiolla, saatiin ulkoa tulevalle kosteusvirralle seuraavat sallittavat vuorokausimäärät: kevytbetoniseinälle 2,59 g/m², tiiliseinälle 7,60 g/m² ja betonisandwich-seinälle 8,64 g/m². Kyseisten seinärakenteiden tapauksessa saisi levyjulkisivun pinta ja saumat siis kastua kevytbetoniseinällä n. 17 päivän välein, tiiliseinällä n. 6 päivän välein ja betonisandwich seinällä kerran 5 päivässä.

Edellä olevat arviot ovat hyvin teoreettisia ja vahvasti varmalla puolella. Ensinnäkin varsinaista 8,4 m korkeata tuuletusrakoa ei avonaisessa saumaratkaisussa esiinny, koska levysaumoissa tapahtuu virtauksia. Yhden kerroksen korkuisen tuuletusraon kosteudenpoistokyky on yli nelinkertainen tutkittuun tuuletusrakoon nähden. Lisäksi kosteudenpoiston taulukon 5.16. tarkastelutavan vuoksi sallitut ulkoa tulevat kosteusmäärät vastaavat talven olosuhteita. Kesällä tuuletusraon kosteudenpoistokyky on yli kymmenkertainen talvikuukausiin verrattuna, jolloin levyihin imeytynyt vesimäärä poistuu varmasti. Talvella taas suurin osa sateista tulee lumena, jolloin veden imeytymistä levyjen takapintaan ei tapahdu edellä esitetyllä tavalla. Huomioon ottaen nämä tekijät voidaan olettaa, että tuuletusraon kosteudenpoistokyky on riittävä poistamaan avosaumarakenteen vuoksi levyjen takapinnoille imeytyneen vesimäärän varsinkin betonisandwich-rakenteen ja tiiliseinän, mutta myös kevytbetoniseinän osalta. Varsinaisia sadevesivuotoja ei rakenteelle voida sallia.

Koska kosteuden läpipääsyä saumallisessa rakenteessa ei voida kokonaan estää, rakenteessa olevat puuosat, varsinkin pystykoolaukset ja tukipuut tulisi tehdä painekyllästetystä puusta. Lisäksi veden poisto seinärakenteesta on suunniteltava huolellisesti. Ikkunoiden yms. yksityis-

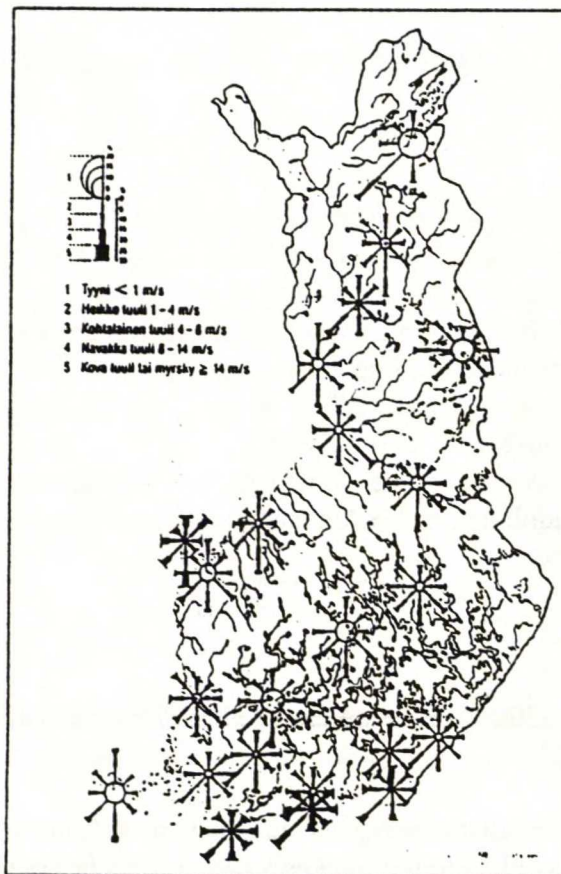
kohtien sekä seinän alaosan detaljit on suunniteltava niin, ettei vesi jää rakenteen sisään, vaan pääsee selkeätä reittiä pitkin seinän ulkopuolelle. Vaakatukipuiden sahauspinnan tulisi mielellään olla kalteva viettäen julkisivulevyyn päin. Muutkin rakenteessa olevat osat on suunniteltava siten, etteivät ne johda vettä sisemmälle rakenteeseen.

Sadetettaessa saumallista rakennetta paineen alaisena tuntui saumojen kohdalla levyjen takana selvä ilmavirtaus. Tarkasteltaessa levykorjausmenetelmää tuuletusraoillisenä ratkaisuna levysaumojen kautta tapahtuvat ilmavirtaukset on siis otettava huomioon osana tuuletusraon virtauksia, jolloin tuuletusraon tuulettavuus ja kosteudenpoistokyky paranevat jonkin verran edellä annetusta arvosta.

Saumallisen kivipintaisen levyratkaisun toiminnan arvioimisessa sadetuskoe on hyvä koe-menetelmä. Sauma- ja kiinnitysratkaisujen suunnittelussa voidaan suhteellisen nopeasti ja pienellä vaivalla nähdä ratkaisun toimivuus ja kehittämistarpeet.

Luvussa 3.3.1. annettua erittäin voimakkaan viistosateen määrää 20 mm/m^2 yhden sateen aikana vastaisi 2 l/min sadetuksella kymmenen (10) minuutin sadetus, kun sadetettava pinta-ala on 1 m^2 . Tehdyssä sadetuskokeessa sadetuspinta-ala oli likimäärin 1 m^2 ja sadetus toteutettiin 2 l/min vesimäärällä ensin 30 minuuttia vakioaineessa ja lisäksi 30 minuuttia muuttuvan paineen alaisena. Sademäärän osalta koetta voidaan siis pitää erittäin rankkana.

Kokeessa käytettyjen paine-erojen vastaavuutta todellisiin oloihin voidaan arvioida taulukossa 5.6. olevan tuulen nopeuden ja siitä aiheutuneen paineen sekä kuvassa 7.15. esitetyn tuulen vuotuisen jakauman perusteella.



Kuva 7.15. Vuotuinen tuulijakauma Suomessa /35/.

Kokeessa käytetty paine 0 Pa vastaa täysin tyyntä tilannetta. 25 Pa vastaa kohtalaisen tuulen nopeutta n. 6 m/s, jolloin lippu liehuu ja ohuet oksat liikkuvat, ja 50 Pa vastaa navakan tuulen nopeutta n. 9 m/s, jolloin pienet lehtipuut huojuvat ja järvissä on vaahtopäälainen. Käytetyt paine-erot vastaavat siis yleisesti Suomessa esiintyviä tuulen nopeuksia.

Rakenteiden painonvaihteluista saadut tulokset olivat hyvin vaihtelevia. Tämä johtui vaikuttavien tekijöiden moninaisuudesta sekä lisäksi laitteiston epätarkkuudesta ja herkkyydestä häiriötekijöille. Alunpitäen sadetuslaite on suunniteltu paljon raskaampien seinäkappaleiden, kuten tiiliseinien sadettamiseen, joissa myös syntyvät painonmuutokset ovat suurempia. Nyt vaa'an antama painonmuutos tuli piirturille voimakkaasti vahvistettuna. Koerakenteen roikkuessa vaa'assa piirturin tekemässä viivassa näkyivät paineen nostot hyppäyksinä alaspäin, jotka piti ottaa huomioon lopullisessa tulosten kirjaamisessa. Lisäksi muut painevaihtelut, kuten oven avaaminen koetilassa näkyivät kuvaajassa. Piirturin tekemä viiva oli 5 - 10 mm leveä vastaten 50 - 100 g painonvaihtelun aluetta johtuen voimakkaasta vahvistuksesta.

Sadetuskokeessa käytettyä sadetuslaitteistoa tulisi kehittää todellisemman sadetustilanteen aikaansaamiseksi. Vesisuuttimet sijaitsevat nykyään yhdessä rivissä, jonka asema valitaan sadetuksen alussa. Olisi parempi käyttää useampia pienempiä suuttimia jakautuneena tasaisesti sadetettavan pinnan alueelle, jolloin pinnalle syntyvä vesijakauma vastaisi todellista sadetta. Kappaleeseen vaikuttanut paine aikaansaatiiin puhaltimella ja tiiviillä kammiolla koeseinän julkisivun puolella. Jos laitteessa lisäksi olisi mahdollisuus paineen vaihtelemiseen erilaisissa jaksoissa, voitaisiin tutkia tuulenpuuskien vaikutusta sadetettavan rakenteen käyttäytymiseen.

7.2. SADETUSKOE II: SAUMATTOMAKSI RAPATTU BLUCLAD-JULKISIVULEVYRAKENNE

7.2.1. TEHTÄVÄ

Sadetuskokeessa tarkasteltiin julkisivun levykorjaukseen liittyen saumattomaksi rapatun levyverhouksen sateenpitävyyttä, pintarappauksen vedenimua ja veden mahdollista tunkeutumista seinän sisempiin rakenteisiin. Kokeessa selvitettiin:

- Saumattomaksi rapatun levyrakenteen vaaka- ja pystysaumadetaljien sateenpitävyys tarkastelemalla saumojen läpi tulevaa vesimäärää ja vuodon alkamisen ajankohtaa rakenteen yli vallitsevan paine-eron arvoilla 0 Pa, 25 Pa ja 50 Pa sekä asteittain nousevan paineen alaisena.
- Veden imeytyminen julkisivumateriaaliin punnitsemalla rakennetta kokeen aikana
- Veden mahdollinen kulkeutuminen seinän sisempiin rakenteisiin levyjen kiinnityksen välityksellä.

7.2.2. KOERAKENNE

Koerakenteena tutkittiin 1300 x 1300 mm² levyseinää. Tutkittavasta koerakennetyypistä tehtiin 3 rinnakkaiskoekappaletta.

Koerakenne III Päälle rapattu levyseinä, alustalevynä kalsiumsilikaattilevy (BluClad).
Levyt kiinnitettiin puukehikkoon ruuveilla (YOKO-Rakentajaruuvi 4,2 x 25 mm, haponkestävä). Levysaumamat olivat pusksaumoja, mutta asennus-

työn tuloksena keskivaakasauma jäi 1 mm auki koekappaleessa III B koko sauman matkalta ja koekappaleissa III A ja III C takaapäin oikeanpuoleisen saumanosan puolelta. Levysaumassa Tyvec-saumateippi, lasikuituverkko ja jäykistävä orgaaninen pohjarappaus (STO-Armierungspuits). Päällä orgaaninen rappauspinnoite (STOLIT K2). Rappaus suoritettiin rappauslastalla. Liite 11.

Jokaisen koerakenteen vaakasaumojen (keskisauma ja alasauma) taakse laitettiin koestusnäytelaudoit (22 X 100, pituus 200 mm), jotka punnittiin ennen sadetusta ja sen jälkeen.

7.2.3. KOEJÄRJESTELYT

Koelaitteistona käytettiin samaa sadetuslaitteistoa kuin sadetuskokeessa I. Kokeessa vesimääränä käytettiin 2 l/min ja paine-erona ensin eri rinnakkaiskappaleille 0 Pa, 25 Pa tai 50 Pa, ja sitten kaikille asteittain 0, 10, 20, 30, 40 ja 50 Pa. Laitteen vesisuuttimet suunnattiin 30° alaspäin vaakatasosta n. 35 cm etäisyydelle levypinnasta. Suuttimet oli kohdistettava n. 25 cm keskivaakasauman yläpuolelle, jotta sauman yli muodostui yhtenäinen kalvo.

7.2.4. KOETULOKSET

7.2.4.1. LÄPÄISEVÄ VESIMÄÄRÄ

Koerakenne ei läpäissyt vettä lainkaan. Yhtenäinen rappauspinta esti veden pääsyn saumaan. Rakenne osoittautui siis sateenpitävyyden kannalta erinomaiseksi.

Koe vastasi tässä tapauksessa vain uuden seinärakenteen tapausta. Ajan kuluessa mahdollisesti syntyvien halkeamien vaikutusta ei tässä kokeessa selvitetty.

7.2.4.2. KOEKAPPALEESSA OLEVA VESIMÄÄRÄ

Liitteessä 12 on esitetty koekappaleissa olevan veden määrä sadetuksen aikana. Sadetuksen ensimmäisen viiden minuutin aikana seinärakenteen paino kasvoi pinnan kastuessa. Tämä näkyy kaikkien koekappaleiden painonmuutoskäyrässä. Sadetuksen jatkuessa pinta kastui vielä jonkin verran lisää yhtenäisen märän alueen kasvaessa. Asteittain nousevalla paineella oli sadetuksen alussa rappauspinnat valmiiksi märkiä, mutta irtovesi oli jo ehtinyt valua pois. Painokäyrissä voidaan nähdä uusi hieman pienempi nousu ensimmäisen viiden minuutin aikana pintaan jäävän veden vaikutuksesta.

Kaikki koekappaleissa oleva vesi sijaitsi kappaleen pinnassa, sillä orgaaninen rappausmateriaali ei imenyt vettä eikä vesi myöskään päässyt seinärakenteen sisempiin osiin. Yhtenäinen vesikalvo muodostui rappauspinnalle vain sadetusalueelle, muutoin vesi valui pinnalla noroina.

Rappauspinta oli kaikissa koekappaleissa samanlainen, joten periaatteessa vain paine-erot vaikuttivat saumattoman rakenteen pinnalla olevaan vesimäärään. Tasaisella paineella sadetettaessa eniten vettä rakenteeseen sitoutui 50 Pa paineella. Alemmilla paineilla erot eivät ole yhtä selvät. Asteittain nousevan paineen jakson alkaessa eri kappaleiden pinnat olivat kastuneet eri määriä, jolloin lähtötilanne oli kullakin kappaleella erilainen. Yhden sadetuskerran jälkeen mitään johtopäätöksiä paineen vaikutuksesta ei voida tehdä.

7.2.4.3. KOSTEUDEN KULKEUTUMINEN RAKENTEESSA

Levyjen takana vaakasaumoissa sijaitsevien kosteusnäytelautojen kastuminen koko sadetusjakson aikana on esitetty taulukossa 7.3. Kastuminen on mitattu veden absoluuttisena painona.

Taulukko 7.3. Kosteusnäytelautojen kastuminen koko sadetusjakson aikana.

| Koekappale | Sadetuksen aikana imeytynyt vesimäärä, g tai ml | |
|---------------|---|----------|
| | keskisauma | alasauma |
| III A | 0,0 | 0,3 |
| III B | 0,2 | 0,1 |
| III C | 0,2 | 0,1 |
| keskiarvo III | 0,1 | 0,2 |

Keskisauman näytelaudat kostuivat keskimäärin hieman vähemmän kuin saumallisessa rakenteessa. Kosteus siirtyi pääasiassa vesihöyrynä paine-erojen aiheuttaman konvektion välityksellä saumarakenteen läpi. Koekappaleessa III A, jossa paine-ero seinän eri puolilla oli nolla, ei tapahtunut kosteuden imeytymistä keskisaumassa olevaan näytelautaan. Alasauman näytelaudan tulosta vääristää näytelaudan sijainti kiinni sadetuslaitteiston alaraamissa, joka oli vielä märkä saumallisten rakenteiden sadetuksen jäljiltä. Näytelaudan kokoisessa puukappaleessa kastumisesta aiheutuva suhteellisen kosteuden muutos oli maksimissaan noin 0,1 %.

7.2.5. SAATUJEN TULOSTEN ARVIOINTI

Saumattomaksi rapattu levyrakenne ei läpäissyt vettä. Saumarakenteen vesihöyryn läpäisevyyden johdosta levyjen takana olevien puuosien kosteuspitoisuus kasvoi keskimäärin 0,15 g sadetuksen aikana. Kokeen tulokset olivat tältä osin odotettavissa, ja onkin todettava, ettei pelkkä sadetuskoe anna riittävää kuvaa rakenteen toiminnasta. Levyjen kosteus- ja lämpötilaeläminen rasittaa saumarakennetta ja asettaa vaatimukset saumassa olevien materiaalien, etenkin rappauksen elastisuudelle. Ajan vaikutusta rappausmateriaalin joustavuuteen ja materiaalien yhteistoimintaan saumassa selvitetään luvussa 8.2. esitetyn sääkokeen avulla, jotta voidaan varmistua rapatun rakenteen toimivuudesta todellisessa seinärakenteessa. Saumarakenteen pitkäaikaiskestävyys vaikuttaa ratkaisevasti rakenteen vedenpitävyyteen.

Todellisessa saumattomaksi rapatussa levyseinässä tulee olemaan liikuntasauvoja sekä muita liittymisdetaljeja, joiden suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota, jottei vesi pääse niiden kautta tunkeutumaan rakenteen sisälle. Liikuntasauvojen ja muiden liittymien kohdalla tulee olla sahaamaton levyreuna, jolloin reunassa oleva mikrosilikoniemulsio suojaa itse levyä.

Vaikka saumojen läpi vesihöyrynä kulkeutunut kosteus onkin vähäistä, voidaan kosteuden olettaa keskittyvän levysaumojen alueelle. Tästä syystä sekä muista lähteistä, kuten liittymisdetaljeista ja rakennuksen sisältä mahdollisesti tulevan kosteuskuormituksen johdosta rakenteessa olevat puuosat, varsinkin pystykoolaukset, tulisi tehdä painekyllästetystä puusta.

Rapatussa rakenteessa ei saumojen kautta tapahtunut merkittävää ilmavirtausta. Tuuletusraon rakenteen laskennallisessa tarkastelussa tuuletusraon korkeus määräytyy siten tapauskohtaisesti seinässä olevien tuuletusaukkojen perusteella.

Saumattomaksi rapatun levyrakenteen sateenpitävyys osoittautui siis sadetuskokeen perusteella erinomaiseksi, joten tässä suhteessa menetelmän kelpoisuus julkisivujen korjausrakenteena on hyvä. Kun seinärakenteen liittymädetaljit suunnitellaan huolellisesti, ei tuuletusrakoon pääse sadevedestä aiheutunutta kosteutta. Tässä suhteessa rakenne on parempi kuin edellä tutkittu saumallinen levykorjausmenetelmä, jossa rakennetta ei avosaumaisena ratkaisuna saada täysin tiiviiksi, vaan eristetyllä ruuvikiinnitykselläkin toteutetussa rakenteessa tapahtuu vähintään veden imeytymistä levyn takapintaan saumojen ja yksittäisten kiinnikkeiden kohdalla.

8. SÄÄRASITUSKOEET

8.1. SÄÄRASITUSKOE I: SAUMALLINEN JULKISIVULEVYRAKENNE MASTERCLAD-, MASTERSTONE- JA CHROMACLAD-JULKISIVU- LEVYILLÄ

8.1.1. TEHTÄVÄ

Säärasituskokeessa tutkittiin lisälämmöneristetyin ja tuuletusraolisella levyrakenteella päällystetyn sandwich-seinän toimivuutta ulkoilman säärasituksia vastaan. Kokeessa selvitettiin:

1. Levyverhouksen säänkestävyys ja sateenpitävyys, erityisesti saumojen käyttäytyminen säärasituksessa.
2. Rakennekerrosten lämpötilojen ja lämpövirtojen riippuvuus lämmöneristysratkaisusta.
3. Rakennekerrosten lämpötilat ja kosteuspitoisuudet.
4. Tuuletusraon lämpötilat ja kosteuspitoisuudet.

Säärasituskoe suoritettiin Valtion Teknisen Tutkimuslaitoksen Rakennusmateriaalilaboratoriossa, ja kokeesta on tehty VTT:n tutkimusselostus N:o RAM1160/93.

8.1.2. KOERAKENNE

Koerakenteena oli Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-julkisivulevyillä verhottu lisäeristetty betonirakenne, jonka mitat olivat 2390 x 2390 mm (liite 13). Taustarakenne vastasi periaatteeltaan betonisandwich-elementtiä, josta sisäkuori oli kuitenkin jätetty pois rakenteen keventämiseksi. Lämmöneristeenä käytettiin vaakakoolauksien väliin asennettua pehmeätä lasivillaa, jonka päälle asennettiin tuulensuojalevy. Ulkoverhous tehtiin neljästä levystä. Verhousrakenteessa oli yksi vaakasauma ja yksi pystysauma. Vaakasaumassa käytettiin muovipinnoitetusta pellistä taivutettua tippalistaa ja avonaisen pystysauman takana oli 40 mm levyinen EPDM-kumikaista. Levyt kiinnitettiin pystykoolaukseen naulaamalla haponkestävillä levynauloilla (2,5 x 30 mm). Ennen naulausta levyihin esiporattiin asennusohjeen mukaisesti 2 mm naulan halkaisijaa suuremmat reiät. Rakenteessa käytetty puutavara ei ollut painekyllästettyä. Koerakenne oli sisäpinnasta lukien seuraava:

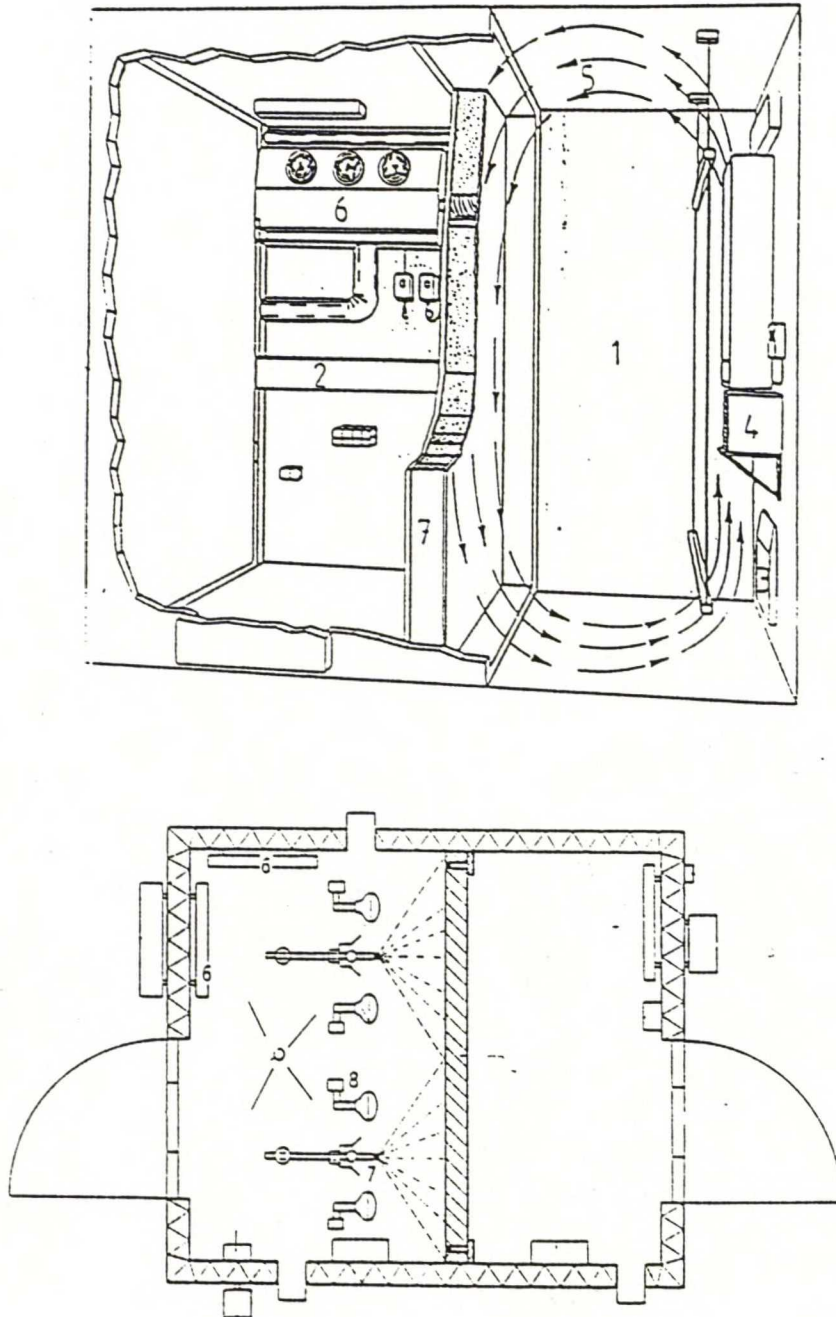
- Lasivilla (Otsolevy-E 120 mm), levykoko 600 x 1400
- Betonilaatta 60 mm, K25
- Lasivilla (Karhulevy) 50 mm, levykoko 560 x 1320
- Tuulensuojalevynä Masterlevy 6 mm
- Pystykoolaus + tuuletusrako 20 mm
- Masterclad (8 mm), Chromaclad (9 mm) ja Masterstone (8 + 2 mm) kalsiumsilikaattilevyt

Seinässä olevan tuuletusraon alareunassa oli rei'itetty suojapelti liitteen 13 mukaisesti ilmavirtauksen mahdollistamiseksi.

8.1.3. KOEJÄRJESTELYT

Koelaitteistona käytettiin VTT:n Rakennusmateriaalilaboratorion säärasituskoelaitteistoa, jossa tutkittavan rakenteen eri puolille voidaan järjestää sisä- ja ulkoilmastoa jäljittelevät olosuhteet. Koelaitteiston periaate näkyy kuvassa 8.1. Kuva 8.2. esittää laitekokonaisuutta ulkoapäin. Koeseinä asennetaan kuvassa erillään olevien kammioiden väliseksi seinäksi. Koelaitteiston

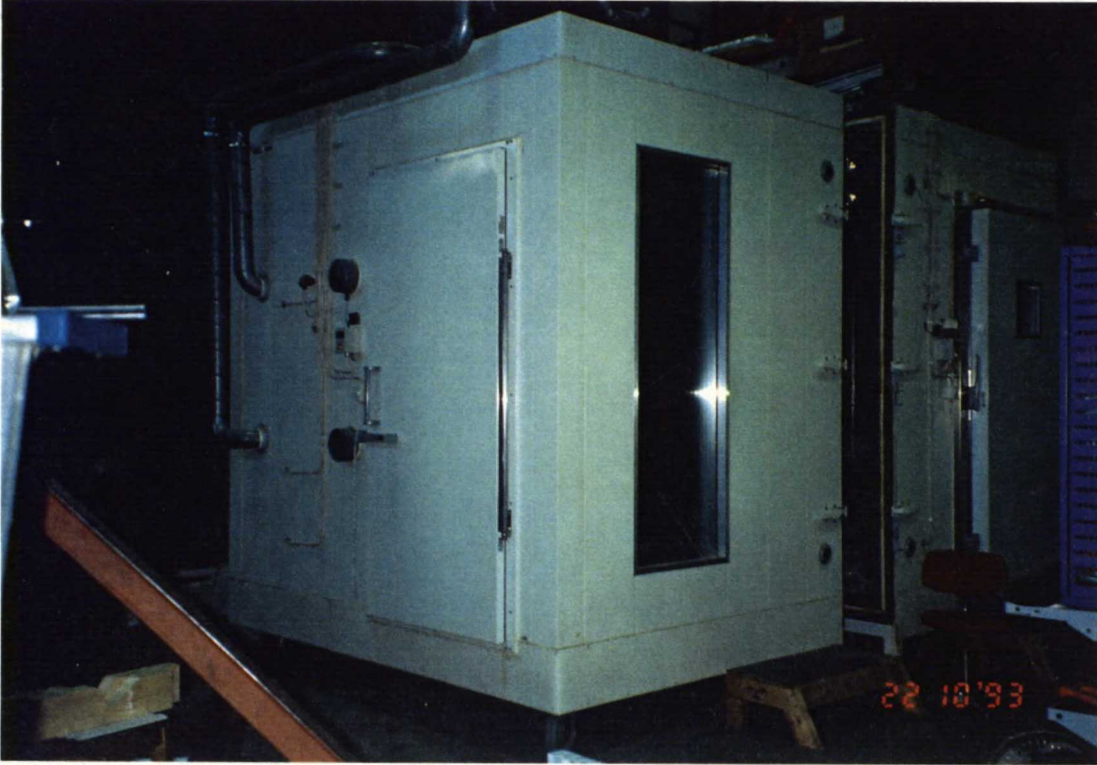
kylmällä puolella oli lisäksi metallikehikko, johon oli kiinnitetty sadetussuuttimet ja IR-lamput tasaisesti koko tutkittavan seinän alueelle (kuva 8.3.).



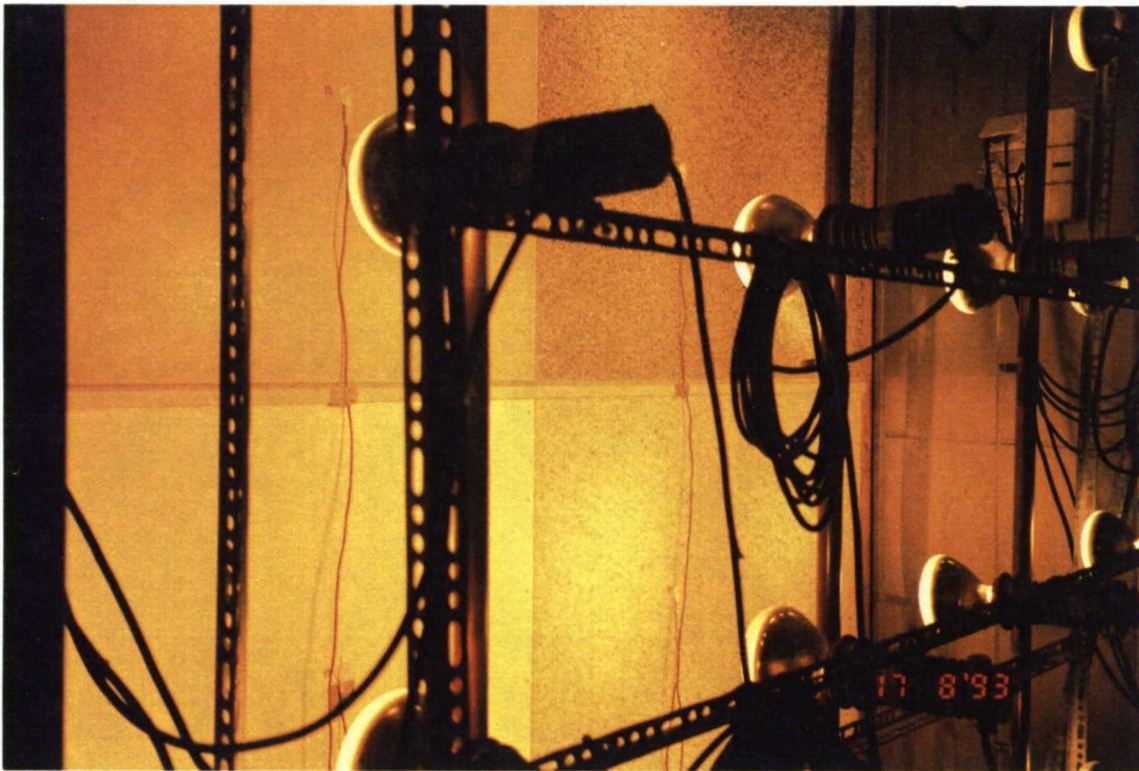
Kuva 8.1. Säärasituskoelaitteiston periaate.

- 1) Lämmin kammio
- 2) Kylmä kammio
- 3) Ilman lämmitys
- 4) Ilman kostutus

- 5) Ilman kierrätys
- 6) Ilman jäähdytys
- 7) Sadetus
- 8) IR-lamput



Kuva 8.2. Säälaitteisto ulkoapäin. Kammioiden välinen koeseinä puuttuu.



Kuva 8.3. Sääkoestuslaitteiston IR-lamput ja sadetuslaitteisto.

Koeilmaston tavoitteena oli aiheuttaa rakenteelle Suomen ilmaston vuotuisia keskimääräisiä ääriolosuhteita vastaavat olosuhdevaihtelut. Koeilmasto perustui ulkoilman rasisussykleihin siten, että ulkoilman pintalämpötila vaihteli -20 °C ja n. $+50\text{ °C}$ välillä. Yhden vuorokauden aikana ajettiin kaksi sykliä. Kokeen kesto oli 45 vuorokautta, josta viiden viimeisen vuorokauden ajaksi ulkoilman olosuhteet säädettiin vakioksi. Tällöin ulkoilman lämpötila oli n. -5 °C , Ulkoilmaston vaihtelut rasisussykliä aikana olivat taulukon 8.1. mukaiset.

Taulukko 8.1. Koeilmaston rasisussykli ja sen eri osien kestoajat.

| Aika | Rasitus |
|---------------|--|
| 00.00 - 06.00 | Jäähdytys: ulkoilman lämpötila -20 °C |
| 06.00 - 08.00 | Tuuletus (tuuletusilma $+20\text{ °C}$) |
| 08.00 - 11.00 | IR-säteily: ulkopinnan lämpötila $+50\text{ °C}$ |
| 11.00 - 11.10 | Sadetus $0,03\text{ l/m}^2\text{s}$ ($1,8\text{ l/m}^2\text{min}$) |
| 11.10 - 12.00 | Tuuletus |

Rakenteen lämpimälle puolelle säädettiin likimain vakio-olosuhteet, jossa huoneilman lämpötilan tavoitearvo oli $20 - 22\text{ °C}$ ja suhteellinen kosteus $50 - 60\%$. Sisäilma säädettiin 50 Pa alipaineiseksi ulkoilmaan nähden.

Kokeen aikana rakenteesta tehtiin seuraavia mittauksia:

- rakennekerrosten ja tuuletusraon lämpötilat
- rakenteen lämpövirrat
- rakennekerrosten kosteudet: rakenteen puuosien kosteudet ja tuuletusrakoon asennetut ns. vertailupala-anturit

Lämpötila- ja lämpövirtamittaukset tehtiin jatkuvana seurantana tiedonkeruulaitteistolla.

Rakenteen puuosien kosteuspitoisuuksia mitattiin rakenteisiin asennettujen antureiden avulla (vastusmittaus). Tuuletusraon kosteuden seuranta perustuu rakenteeseen asennettuihin $10 \times 20 \times 50\text{ mm}$ puupaloihin, joiden kosteuksia mitattiin sähköisesti.

Lisäksi rakenteen tilaa seurattiin kokeen aikana silmämääräisillä tarkastuksilla. Säärasitus-kokeen jälkeen seinärakenne purettiin ja eri rakennekerrokset tarkastettiin ja valokuvattiin.

8.1.4. KOETULOKSET

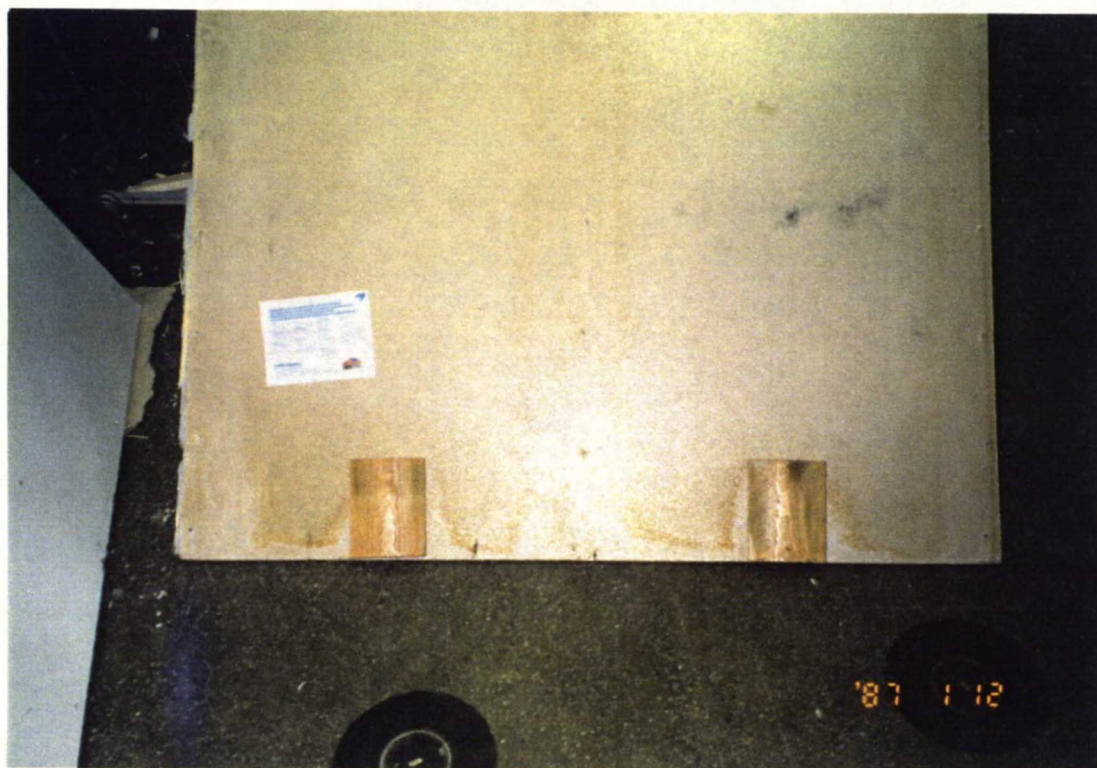
8.1.4.1. HAVAINNOT

Kokeen aikana tehtyjen silmämääräisten tarkastelujen perusteella rakenteessa ei havaittu muutoksia.

Kokeen päätyttyä rakennetta purettaessa havaittiin kosteusvaurioita seinälevyn takaisissa materiaali-kerroksissa seinän alaosissa. Ulkoilman kiinnityskohdat (naulanreiät) olivat päästäneet vettä rakenteeseen samalla tavoin kuin luvussa 6.1. esitettyssä sadetuskokeessa oli tapahtunut vastaavalla kiinnityksellä. Tämän lisäksi rakenteen alareunan suojana ollut pelti oli asennusvaiheessa kallistunut seinään päin siten, että seinärakenteen sisään vuotanut vesi ei

päässyt poistumaan rakenteesta vaan johtui sisempiin materiaalikerroksiin. Lisäksi sadetusvesi oli päässyt levyjen alareunan ja pellin välisestä saumasta tunkeutumaan rakenteeseen.

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-levyissä havaittiin takapinnan likaantumista vesivuotojen vaikutuksesta, mutta muutoin levyjen kunto oli hyvä (kuva 8.4.). Kuvassa 8.5. näkyy sääkoestettu seinä ulkoverhouslevyjen purkamisen jälkeen. Seinän alareunaan keskittyneen vesirasituksen vuoksi ulkoverhouksen alla oleva painekyllästämätön pystykoolaus oli kastunut ja hometta esiintyi koolauksen alaosissa n. 300 mm matkalla. Tuulensuoja oli kostunut 400 - 600 mm korkeudelta alareunastaan ja levymateriaali oli pehmennyttä. Lisälämmöneristeen pinta oli myös seinän alaosissa kostea, mutta muutoin ei eristeessä havaittu muutoksia. Betoniseinän ulkopinta vaikutti kuivalta muilta osin paitsi yhdessä kohdassa seinän reunassa, jossa betoni-seinän ja laitteistoon kuuluvan puuraamin väliin oli jäänyt pieni eristämätön rako. Kosteutta oli päässyt raon kautta seinän lämpimältä puolelta ja märkä alue oli levinnyt n. 150 mm raon ympärille.



Kuva 8.4. Masterstone-levyn takapinta ja alareunan tukipuut säärasituskokeen jälkeen.



Kuva 8.5. Seinärakenteen pystykoolaukset ja tuulensuojalevyt säärasituskokeen jälkeen.

N. 600 mm korkeudelta ylöspäin seinärakenteissa ei havaittu kosteutta tai kosteuden aiheuttamia muutoksia rakennusmateriaaleissa muualla kuin yhdessä vaakatukipuussa, joka kuvassa 8.5. näkyy vasemmalla seinän keskikorkeudella. Tukipuun kastuminen johtuneee runsaasta paikallisesta vesivuodosta naulanreiän kautta.

8.1.4.2. RAKENTEIDEN LÄMPÖTILAT JA LÄMPÖVIR RAT

Rakenteesta tehtyjen lämpötilamittausten tuloksia 10 viimeisen koevuorokauden ajalta on liitteessä 14. Rakenteen ulkopinnan minimi- ja maksimilämpötilat ovat olleet mittauskohdasta riippuen -20 °C ... -18 °C ja $+36\text{ °C}$... $+50\text{ °C}$. Rakenteen ulkopinnan tason suuntaiset lämpötilaerot ovat olleet suurimmillaan säteilyn vaikuttaessa noin 15 °C . Tämä johtunee säteilylamppujen aiheuttamista paikallisista lämpötilamaksimeista sekä verhouslevyjen pintojen värien ja materiaalien erilaisista säteilyn absorptiokertoimista. Tuuletusraon sisäpintojen minimi- ja maksimilämpötilat olivat -15 °C ... -10 °C ja $+34\text{ °C}$... $+44\text{ °C}$, lisälämmöneristeen ulkopinnan -12 °C ... -7 °C ja $+30\text{ °C}$... $+42\text{ °C}$ sekä lisäeristeen sisäpinnan $+8\text{ °C}$ ja $+12\text{ °C}$. Seinän sisäpinnan lämpötila noudattaa melko tarkasti sisäilman lämpötiloja.

Mittaustulosten perusteella rakenteen eristyskerroksissa ei ole tapahtunut voimakkaita virtauksia. Kokeen lopussa tasaisen lämpötilan aikana mitattujen lämpövirtojen perusteella laskettu rakenteen lämmönvastus mittauskohdassa on noin $4,5\text{ m}^2\text{K/W}$ pintavastukset mukaanlukien. Tällöin rakenteen k-arvoksi samassa kohdassa saadaan n. $0,22\text{ W/m}^2\text{K}$.

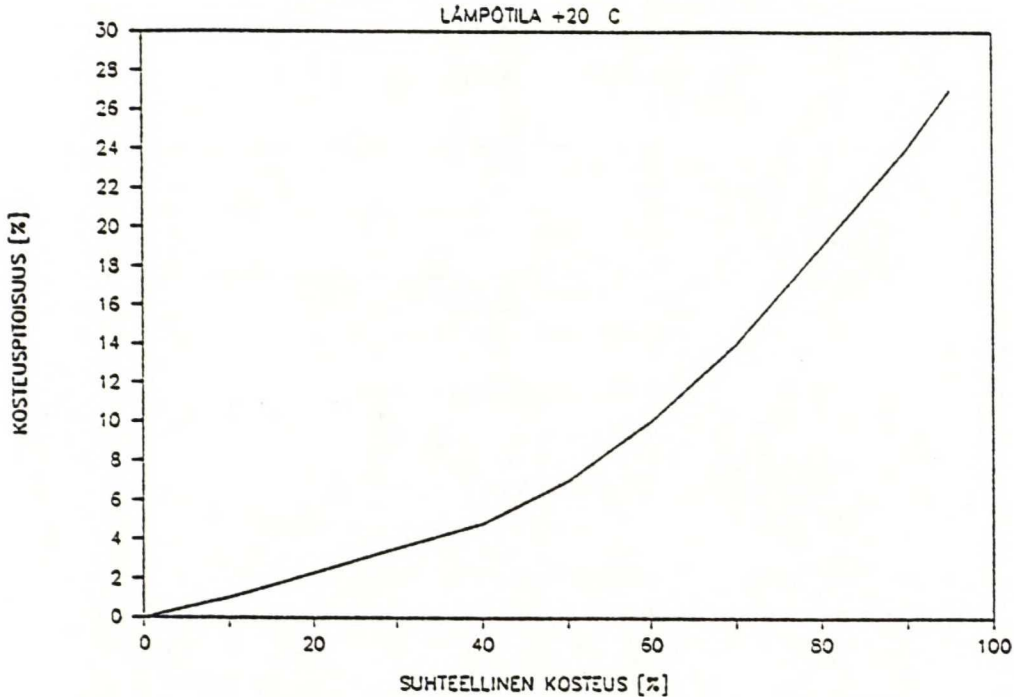
8.1.4.3. RAKENTEIDEN KOSTEUEDET

Rakenteesta tehtyjen kosteusmittausten tulokset sekä mittauspisteet ovat liitteenä 15. Rakenteen ulkoverhouksen alla oleva pystykoolaus kostui kokeen rasitusvaihdosten aikana voimakkaasti alareunastaan. Kosteuspitoisuuden käyrässä näkyvä jyrkkä kosteuspitoisuuden kasvaminen n. 25 vuorokauden jälkeen aiheutui luultavasti siitä, että seinän alareunan märkä rintama on saavuttanut mittauspisteen. Maksimissaan pystykoolauksen alareunan kosteuspitoisuus oli noin 58 %. Rasitusvaihdosten jälkeen vallinneiden vakio-olosuhteiden aikana ei rakenteeseen enää kohdistunut sadetuskuormitusta ja pystykoolaus kuivui alaosastaan varsin nopeasti, ja kokeen lopussa kosteuspitoisuus oli 28 %. Seinän keskiosalla puukoolauksen kosteuspitoisuus nousi tasaisesti kokeen aikana ja oli maksimissaan kokeen lopussa 25 %. Seinän yläosan kosteuskäyrä on muodoltaan samanlainen keskiosan käyrän kanssa, mutta vallinneet kosteuspitoisuudet olivat pienempiä. Seinän yläosassa pystykoolauksen maksimikosteuspitoisuus kokeen lopussa oli 18 %.

Tuuletusraon alaosan ilmatilassa olleen puuanturin kosteus oli vaihtelevien sääolosuhteiden jälkeen n. 15 % ja vakio-olosuhteiden jälkeen 20 %. Kuvassa 8.6. on esitetty ilman suhteellisen kosteuden riippuvuus puuanturin kosteuspitoisuudesta huoneenlämmössä puuanturin kuivuuksessa. Todellisuudessa puuantureissa tapahtui kokeen aikana enimmäkseen kastumista, joten puun kosteushystereesistä johtuen tuuletusraon suhteelliset kosteuspitoisuudet ovat jonkun verran käyrän arvoja suurempia. Alaosan puuantureiden kosteutta vastaava ilman kosteus pitoisuus oli käyrän mukaan n. 72 % ja 81 %. Tuuletusraon yläosan kosteus pitoisuus oli alaosan kosteus pitoisuutta pienempi, vaihtelevien sääolosuhteiden jälkeen 8 % ja vakio-olosuhteiden jälkeen 14 % vastaten ilman kosteus pitoisuuksia 52 % ja 70 %.

Betoni laatan ulkopuolisessa eristekerroksessa olevan vaakakoolauksen kosteudet olivat kokeen lopussa 15 - 19 %, kosteus pitoisuuden ollessa seinän alaosassa hieman yläosaa suurempi. Kosteudet vastaavat rakenteen toiminnan kannalta tavanomaista tasoa.

PUUANTURIN KUIVUMINEN



Kuva 8.6. Vertailupala-anturin kuivumiskäyrä huoneilman lämpötilassa.

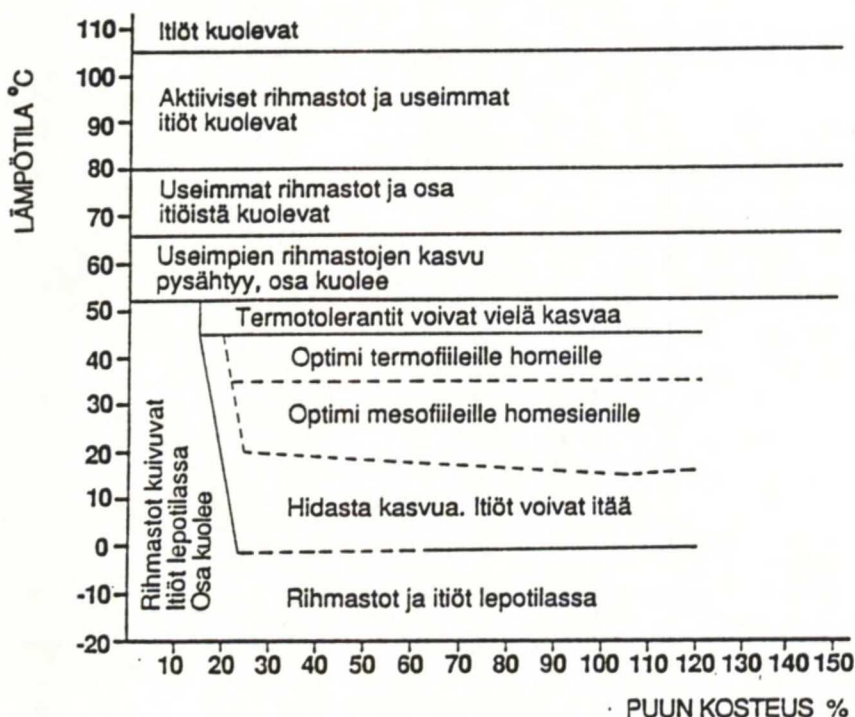
8.1.5. SAATUJEN TULOSTEN ARVIOINTI

Saatujen tulosten perusteella rakenneratkaisun toimivuus riippuu detaljiratkaisuista, lähinnä levyjen kiinnitystavasta ja suojapeltien toteutuksesta. Ulkoverhouksen naulakiinnitys ei ollut toimiva ratkaisu sateelle alttiina olevan seinärakenteen kiinnitystavaksi. Levyjen kiinnitys vaatii lisäeristykseen, jotta vesi ei pääse tunkeutumaan rakenteeseen kiinnitysreikien kautta.

Ulkoverhouksen alla olleiden pystykoolauksen ja tuulensuojalevyn kastuminen johtui rakenteen alareunan suojana olleen pellin virheellisestä suunnittelusta ja asennustavasta. Pellin yläreunaan syntyi kallistus sisäänpäin rakenteeseen, eikä ulkoverhouksen levyjen kiinnityskohdista sekä levyjen alareunan ja kyseisen pellin välisestä saumasta tuuletusrakoon vuotanut vesi päässyt poistumaan pellissä olevien tuuletusrakojen kautta, vaan tunkeutui seinän alaosaan tuuletusraon sisäpuolisiin rakenteisiin. Todellisessa seinärakenteessa olevien suojapeltien ja muiden liittymädetaljioiden suunnitteluun ja asennukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota vastaavanlaisten virheiden estämiseksi. Rakenteessa käytettävä puutavara tulisi lisäksi olla painekyllästettyä.

Tuuletusraon ilman kosteuden yläseinää suurempi arvo seinän alaosaan johtui alareunan kostumisesta sekä lisäksi tuuletusraossa alhaalta ylös tapahtuvasta ilman liikkeestä. Ilmavirtauksen johdosta rakenne kuivui yläreunasta alareunaa tehokkaammin.

Pystykoolauksen alaosaan esiintynyt homekasvu ei varsinaisesti vaurioita puurakenteita, mutta niiden esiintyminen on varoitus mahdollisesta lahoamisesta, koska rakenteen kosteus- ja lämpötilaolosuhteita on tutkittu lähteessä /44/, ja tutkimuksen perusteella on homesienten itämiseen, kasvuun ja elinkyvyn säilymiseen vaikuttavat olosuhteet koottu kuvaan 8.7.



Kuva 8.7. Homesienten itämiseen, kasvuun ja elinkyvyn säilymiseen vaikuttavat lämpötila- ja kosteusolosuhteet /44/.

Homesienet kasvavat parhaiten, kun ilman suhteellinen kosteus on suuri, yli 95 %, ja lämpötila noin +20 °C - +40 °C. Homeiden kasvu hidastuu voimakkaasti ilman suhteellisen kosteuden laskiessa alle 90 %:n ja ilman alin kosteuspitoisuus homeiden kasvamiselle on n. 80 %.

Lämpötilan ollessa optimialueen alapuolella vaadittu suhteellinen kosteus on suurempi, kun taas optimialueen korkeilla lämpötiloilla homeutumiskosteuspitoisuus oli alempi kuin +20 °C:n lämpötilassa. Puumateriaalin homeutumiseen vaikuttavat kosteuden ja lämpötilan lisäksi myös kasvualustan kemiallinen koostumus, ravinnetilanne ja happamuus, ilmanvaihto ja ilman kaasukoostumus.

Säärasituskokeessa tuuletusraon alaosassa oli optimaalinen kosteuspitoisuus homesienten kasvulle. Tuuletusraon keskiosalla kosteuspitoisuus nousi kokeen aikana, ja oli lopussa optimialueen reunalla, mutta yläosassa kosteuspitoisuudet olivat homekasvua ajatellen liian alhaisia. Lämpötila vaihteli kokeen aikana optimialueelta lämpötilaan, jossa rihmastot ja itiöt ovat lepotilassa. Vaakakoolausten kosteuspitoisuudet eivät olleet kriittisiä homekasvua ajatellen.

Rakenteen tuuletus toimi odotetulla tavalla, ja ratkaisu on siten käyttökelpoinen myös käytännön rakentamisessa. Kokeen lopussa valliinheidenden vakio-olosuhteiden aikana tapahtunut pystykoolausten nopea kuivuminen kertoo osaltaan rakenteen tuuletusraon toimivuudesta. Tuuletusraon yläosan kosteuspitoisuudet osoittavat, että rakenne, jossa ei esiinny sadevesivuotoja, kykenee tuulettumaan ja pysymään riittävän kuivana homeutumisen välttämiseksi.

Rakenteen lämpötekniisessä toimivuudessa ei havaittu ongelmia. Tuulensuojana ollut Masterlevy detaljeineen esti hyvin eristystä huonontavat ilmavirtaukset lämmöneristystilassa. Tehtyjen mittausten mukaan tutkittu seinärakenne, josta tosin puuttui sandwich-seinän sisäkuori, täyttää Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annetun k-arvovaatimuksen $< 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Käytetty koelaitteisto soveltui hyvin kokonaisen seinärakenteen toiminnan tutkimiseen säätilan vaihtelujen alaisena. Tosin pelkän säärasituskokeen avulla olisi ollut hyvin vaikea päätellä ulko-verhouksen vesivuotokohtia, mutta yhdistettynä sadetuskokeeseen kokeiden tulokset täydensivät toisiaan ja antoivat yhdensuuntaisen kuvan ratkaisun toimivuudesta. Tehdyssä kokeessa rasitusyklejä oli 80 kpl ja lisäksi lopussa viiden vuorokauden yhtenäinen pakkasjakso. Jäätymisen tapahtuessa seinä oli aina märkä, eikä rakenteen annettu kuivua sadetusten välillä. Todellisessa seinärakenteessa eivät olosuhteet ole näin ankarat, joten koetta voidaan pitää vaativana. Rasitusykkien määrän vastaavuutta ulkoilmassa tapahtuvaan säärasitukseen on hyvin vaikea arvioida, eikä kokeen avulla tule tulkita rakenteen kestävyyttä todellisessa rakennuksessa vuossissa mitattuna.

8.2. SÄÄRASITUSKOE II: SAUMATTOMAKSI RAPATTU BLUCLAD-JULKISIVURAKENNE

8.2.1. TEHTÄVÄ

Säärasituskokeessa tutkittiin lisälämmöneristetyin ja tuuletusraoilla saumattomaksi rapatulla levyrakenteella päällystetyn sandwich-seinän toimivuutta ulkoilman säärasituksia vastaan. Kokeessa selvitettiin:

1. Levyverhouksen säänkestävyys ja sateenpitävyys, erityisesti saumojen käyttäytyminen säärasituksessa.
2. Rakennekerrosten lämpötilojen ja lämpövirtojen riippuvuus lämmöneristysratkaisusta.
3. Rakennekerrosten lämpötilat ja kosteuspitoisuudet.
4. Tuuletusraon lämpötilat ja kosteuspitoisuudet.

Säärasituskoe suoritettiin Valtion Teknisen Tutkimuslaitoksen Rakennusmateriaalilaboratoriossa, ja kokeesta on tehty VTT:n tutkimusselostus N:o RAM1161/93.

Lisäksi varsinaisen tutkimusohjelman ulkopuolella koeseinää rakennettaessa kerättiin kokemuksia BluClad-levyn rappaustyön suorituksesta.

8.2.2. KOERAKENNE

Koerakenteena oli BluClad-levyillä verhottu lisäeristetty betonirakenne, jonka mitat olivat 2970 x 2970 mm (liite 16). Rakenteen ulkopinta oli rapattu. Taustarakenne vastasi periaatteeltaan betonisandwich-elementtiä, josta sisäkuori oli kuitenkin jätetty pois rakenteen keventämiseksi. Lisälämmöneristeenä käytettiin jäykkää lasivillaa, jonka pinnassa oli tuulensuojapaperi valmiina. Eristyslevyjen saumat teipattiin. Pystykoolaus kiinnitettiin eristeen läpi suoraan betoniin. Rakenteessa käytetty puutavara ei ollut painekyllästettyä. Ulko-verhoitus tehtiin kuudesta BluClad-levystä, joiden molemmat puolet oli esikäsitelty mikrosilikoniemulsiolla (kosteudeneristys). Levyt kiinnitettiin pystykoolaukseen haponkestävillä 4,2 x 25 mm ruuveilla ja levysaumat asennettiin puskuun.

Koerakenne oli sisäpinnasta verhouksilevyihin saakka seuraava:

- Lasivilla (Otsolevy-E 120 mm), levykoko 600 x 1400 mm
- Betonilaatta 60 mm, K25

- Jäykkä lasivilla (Runkokarhulevy-EJ), 30 mm erikoispaksuus, saumat teipattu Tyvec-teipillä
- Pystykoolaus + tuuletusrako 20 mm
- BluClad kalsiumsilikaattilevyt 975 x 1490 mm, molemmin puolin kosteuden-eristys mikrosilikoniemulsiolla

Ulkopinta jaettiin pystysuunnassa kahteen yhtä suureen rappauskenttään, jotka rapattiin kahdella erityyppisellä levyvalmistajan hyväksymällä rappausmateriaalilla. Molempiin kenttiin kiinnitettiin ensin seuraavat materiaalit:

- Tyvec-teippi 66 mm leveä, liimaraidat reunoissa 20 mm (levysaumoissa vain liitteen 00X osoittamissa tummennetuissa kohdissa)
- Lasikuituverkko 250 mm leveä kaikissa levysaumoissa upotettuna kyseisessä kentässä käytettyyn vahvistusrappaukseen

Seinän ylemmän osan rappaus tehtiin orgaanisilla rappausmateriaaleilla siten, että vahvistusrappaus levitettiin lastalla ja pintarappaus ruiskulla. Rappausmateriaalit olivat seuraavat:

- STO-RFP (vahvistusrappaus) saumoissa n. 300 mm leveydeltä
- STOLIT K 2 pintarappaus

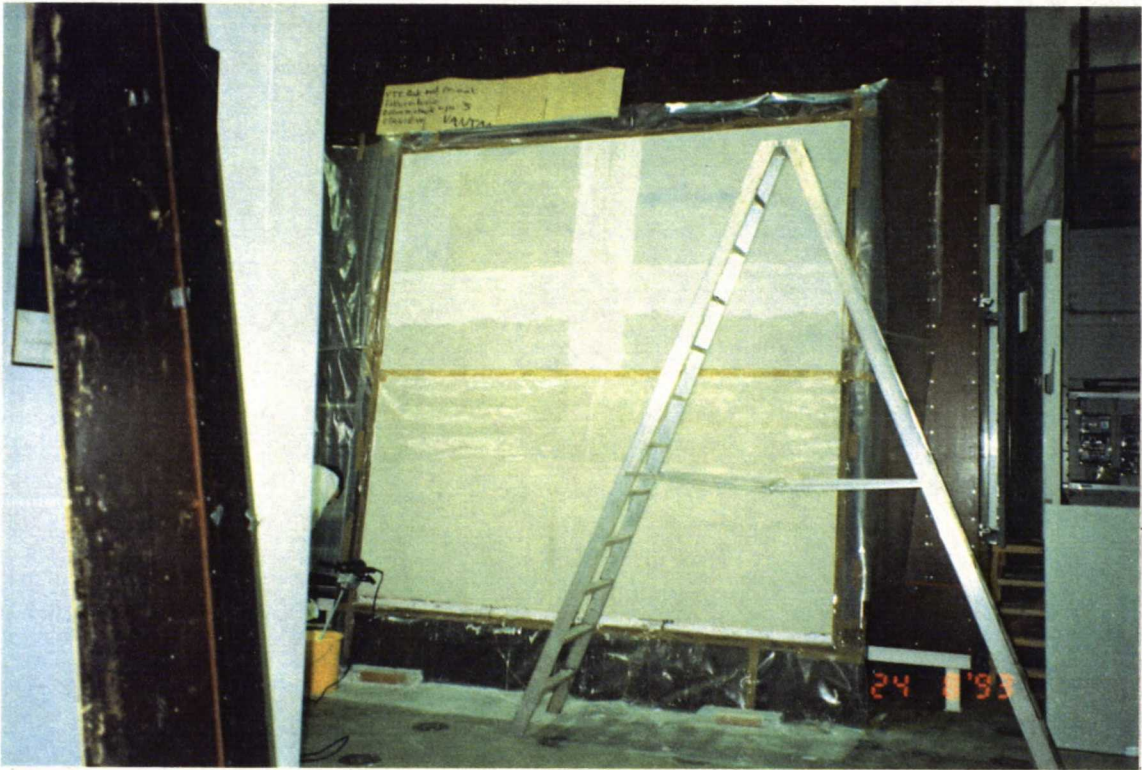
Seinän alemman osan rappaus tehtiin mineraalipohjaisilla rappausmateriaaleilla siten, että muovidispersiopohjustus levitettiin siveltimellä, vahvistusrappaus lastalla ja pintarappaus ruiskulla. Rappausmateriaalit olivat seuraavat:

- KNAUF Betokontakt (muovidispersio + hiekka), laimennus veteen 1:1, koko alueella
- KNAUF/MARMORIT SM 700 (vahvistusrappaus) koko alueella
- Finnseco KS pintarappaus

Alemman osan vahvistusrappaus oli myös tarkoitus levittää vain sauman alueelle. KNAUF:in pintarappauksen toimitusvaikeuksien vuoksi pintarappauksena käytettiin Finnseco KS rappausta, ja valmistajan toivomuksesta vahvistusrappaus levitettiin koko rapattavalle alueelle.

Kuvassa 8.8. näkyy koeseinä ylä- ja alaosan saumojen verkottamisen ja vahvistusrappausten levittämisen jälkeen, ja kuvassa 8.9. on pintarapattu koeseinä. Ennen pinnoitusta pohjarappaus sai kuivua huoneenlämmössä yhden vuorokauden ajan. Pinnoittamisen jälkeen seinän kuivumisaika oli yli kaksi viikkoa ennen kokeen aloittamista.

Seinässä olevan tuuletusraon alareunassa oli rei'itetty suojapelti liitteen 16 mukaisesti ilma-virtauksen mahdollistamiseksi.



Kuva 8.8. Koeseinä lasikuituverkon asentamisen ja vahvistusrappausten jälkeen. Seinän yläosassa lasikuituverkko ja STO-RFP saumojen alueella, alaosassa lasikuituverkko saumojen alueella ja KNAUF/MARMORIT SM 700 koko rappaus-alueella.



Kuva 8.9. Koeseinä pintarappausten ruiskuttamisen jälkeen. Seinän yläosassa STOLIT K2 ja alaosassa FINNSECO KS.

8.2.3. KOEJÄRJESTELYT

Koelaitteistona käytettiin samanlaista VTT:n Rakennusmateriaalilaboratorion säärasituskoe-laitteistoa kuin saumallisenkin rakenteen tutkimisessa, jossa tutkittavan rakenteen eri puolille voidaan järjestää sisä- ja ulkoilmastoa jäljittelevät olosuhteet. Laitteiston kylmällä puolella oli lisäksi metallikehikko, johon oli kiinnitetty sadetussuuttimet ja IR-lamput tasaisesti koko tutkit-tavan seinän alueelle. Koelaitteiston periaate näkyy kuvissa 8.1., 8.2 ja 8.3.

Koeilmaston tavoitteena oli aiheuttaa rakenteelle Suomen ilmaston vuotuisia keskimääräisiä ääriolosuhteita vastaavat olosuhdevaihtelut. Koeilmasto perustui ulkoilman rasisussykleihin . siten, että ulkoverhouksen pintalämpötila vaihteli $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja n. $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Yhden vuoro-kauden aikana ajettiin kaksi sykliä. Kokeen kesto oli 37 vuorokautta, josta viiden viimeisen vuorokauden ajaksi ulkoilman olosuhteet säädettiin vakioksi. Tällöin ulkoilman lämpötila oli n. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ulkoilmaston vaihtelut rasisussykliä aikana olivat taulukon 8.1. mukaiset.

Rakenteen lämpimälle puolelle säädettiin likimain vakio-olosuhteet, jossa huoneilman lämpö-tilan tavoitearvo oli $20 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja suhteellinen kosteus $50 - 60\%$. Sisäilma säädettiin 50 Pa ali-paineiseksi ulkoilmaan nähden.

Kokeen aikana rakenteesta tehtiin seuraavia mittauksia:

- rakennekerrosten ja tuuletusraon lämpötilat
- rakenteen lämpövirrat
- rakennekerrosten kosteudet:
 - kosteusnäytteet lämmöneristeestä
 - rakenteen puuosien kosteudet
 - tuuletusrakoon asennetut ns. vertailupala-anturit
- rappauspinnan muodonmuutokset

Lämpötila- ja lämpövirtamittaukset tehtiin jatkuvana seurantana tiedonkeruulaitteistolla. Rakenteen puuosien kosteuspiitoisuuksia mitattiin rakenteisiin asennettujen antureiden avulla (vastusmittaus). Tuuletusraon kosteuden seuranta perustuu rakenteeseen asennettuihin $10 \times 20 \times 50\text{ mm}$ puupaloihin, joiden kosteuksia mitattiin sähköisesti. Kosteusnäytteiden kosteudet määritettiin kuivapainojen perusteella. Rappauspinnan muodonmuutoksia mitattiin pintaan kiinnitettyjen mittanastojen avulla.

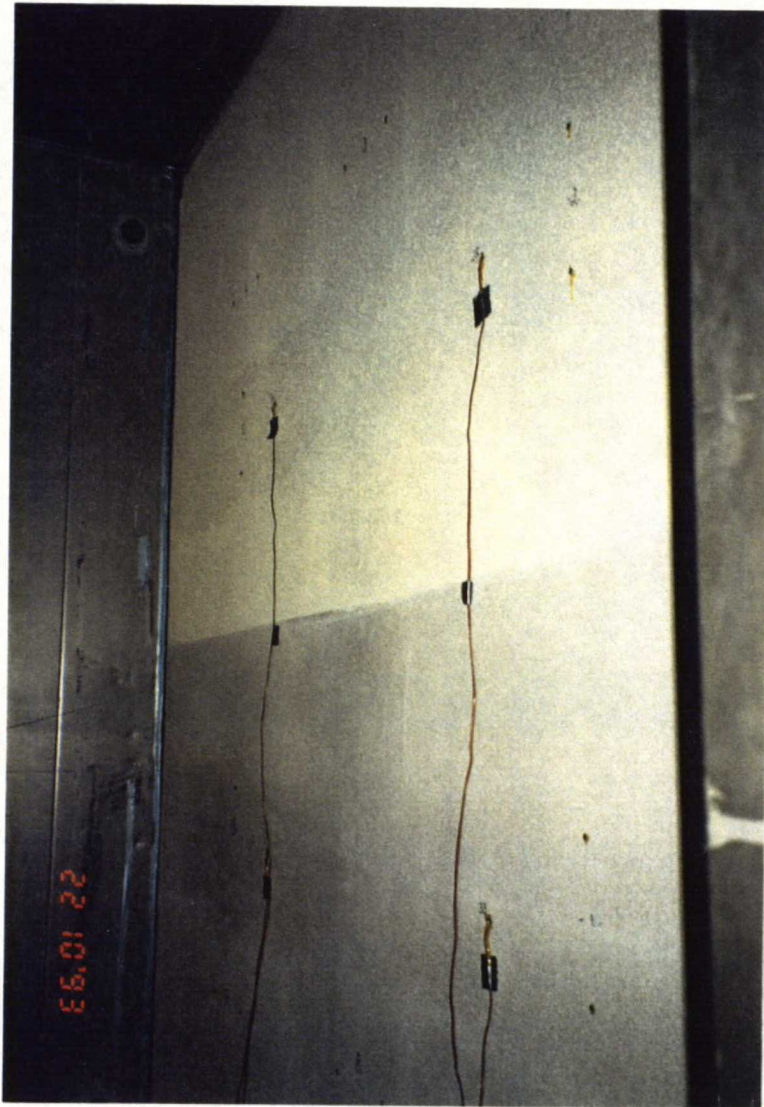
Lisäksi rakenteen tilaa seurattiin kokeen aikana silmämääräisillä tarkastuksilla. Säärasitus-kokeen jälkeen seinärakenne purettiin ja eri rakennekerrokset tarkastettiin ja valokuvattiin.

8.2.4. KOETULOKSET

8.2.4.1. HAVAINNOT

Koeseinän rakentamisen yhteydessä tehtiin havaintoja käytetyn rappausmenetelmän, lähinnä saumaratkaisun onnistumisesta. Havaittiin, että tehtäessä saumaratkaisu levyvalmistajan ohjei-den mukaisesti siten, että lasikuituverkko ja vahvistusrappaus ovat vain levysaumojen alueella ja pintarappauksena käytetään ruiskutettua ohutta rappauskerrosta, muodostuu saumoihin jonkin verran paksummat kohdat, jotka näkyvät pintarappauksen alla. Myös saumateippi näkyi erikseen rappauspinnan alta.

Kokeen aikana tehtyjen silmämääräisten tarkastelujen perusteella rakenteessa ei havaittu muutoksia. Pintarappauksessa ei näkynyt mitään merkkejä halkeilusta tai muista vaurioista. Kuvassa 8.10. koeseinä on koestuslaitteessa tasaisen pakkasjakson aikana. Rappauspinta on hyväkuntoinen, mutta rappausmenetelmän ja käytetyn ohuen pintarappauksen vuoksi rappauskerroksen saumarakenteet erottuvat pinnasta.



Kuva 8.10. Rapattu koeseinä säärasituskokeessa tasaisen pakkasjakson aikana.

Kokeen päätyttyä rakenne purettiin kerros kerrokselta. Purkaminen tapahtui heti kokeen lopettamisen jälkeen, joten rakenteessa esiintyvä kosteus esiintyi huurteena.

Ulkooverhouksen läpi ei kokeen aikana ollut tapahtunut vesivuotoja. Rakenteen alaosan pelli-tyksen ja verhouslevyn saumasta sen sijaan pääsi vettä rakenteeseen ja pelli epäonnistuneen muotoilun vuoksi vesi ei poistunut kokonaan tuuletusreikien kautta. Vesivuotojen johdosta runkokarhulevyn alareuna oli kostunut kokeen aikana.

Rappauspinta oli pysynyt ehjänä ja muuttumattomana kokeen aikana. BluClad-levyjen taustassa oli huurretta koko seinän alalla, mutta levymateriaalin ja mikrosilikonipinnan kunto oli hyvä. Pystykoolausten pinnat vaikuttivat seinän alaosassa kosteilta, mutta muutoin puu oli kuivaa ja kauttaaltaan hyvässä kunnossa. Runkokarhulevyn ulkopinnan muovikuitukankaan taustassa oli jäätyneitä vesihelmiä rakenteen ala- ja keskiosissa. Yläreunassa vesihelmiä ei ollut. Kuitukankaan ulkopinnassa oli selviä merkkejä kankaan kostumisesta kokeen aikana (kuva 8.11.).



Kuva 8.11. Koeseinän alaosan pystykoolaukset ja lämmöneristeen muovikuitukangas säärasituskokeen jälkeen, kun seinän alimmat verhouslevyt oli poistettu.

8.2.4.2. RAKENTEIDEN LÄMPÖTILAT JA LÄMPÖVIR RAT

Rakenteesta tehtyjen lämpötilamittausten tuloksia 10 viimeisen vuorokauden ajalta on liitteessä 17. Rakenteen ulkopinnan minimi- ja maksimilämpötilat olivat mittauskohdasta riippuen $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rakenteen ulkopinnan tason suuntaiset lämpötilaerot olivat suurimmillaan $10 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ johtuen luultavasti säteilylampujen aiheuttamista paikallisista lämpötilamaksimeista ja pintarappauksen eroista levyn ylä- ja alaosan välillä. Tuuletusraon minimi- ja maksimilämpötilat olivat $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lisäeristeen sisäpinnan $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Seinän sisäpinnan lämpötila noudattaa melko tarkasti sisäilman lämpötiloja.

Mittaustulosten perusteella rakenteen eristyskerroksissa ei ole tapahtunut voimakkaita virtauksia. Kokeen lopussa mitattujen lämpövirtojen perusteella laskettu rakenteen lämmönvastus mittauskohdassa oli noin $3,9\text{ m}^2\text{K/W}$ pintavastukset mukaanlukien. Tällöin rakenteen k-arvoksi samassa kohdassa saadaan n. $0,26\text{ W/m}^2\text{K}$.

8.2.4.3. RAKENTEIDEN KOSTEUDET

Rakenteesta tehtyjen kosteusmittausten tulokset sekä mittauspisteet ovat liitteessä 18. Betoni- ja puulaatan ulkopinnassa olleet vertailupalat kostuivat kokeen alussa voimakkaasti johtuen betoni- ja puulaatan kuivumisesta kokeen kuluessa. Maksimissaan vertailupalojen kosteus seinän alaosassa oli $47\text{ } \%$ ja yläosassa $34\text{ } \%$. Vertailupalat kuivuivat käyttöolosuhteita vastaavalle tasolle kokeen kuluessa ($20\text{ } \%$ alaosassa ja $14\text{ } \%$ yläosassa).

Ulkoverhouksen takana olevan pystykoolauksen kosteudet olivat kokeen päätyttyä tehtyjen kertamittausten perusteella alaosassa $23 - 28\text{ } \%$, keskiosassa $19 - 22\text{ } \%$ ja yläosassa $12 - 14\text{ } \%$ puun kuivapainosta. Kokeen aikaiset pystykoolauksen kosteuskäyrät antoivat samanlaisia tuloksia. Runkokarhulevystä rakenteen alaosaan otetun näytteen perusteella muovikuitukankaassa tai sen taustassa (vesihelmet) oli kosteutta kokeen päätösvaiheessa noin 30 g/m^2 . Runkokarhulevyn lasivillan kosteuspitoisuus seinän alaosassa oli $3 - 5\text{ } \%$ kuivapainosta.

Tuuletusraon alaosan ilmatilassa olleen puuanturin kosteus oli maksimissaan 22 vuorokauden kohdalla $22\text{ } \%$ ja kokeen lopussa kosteuspitoisuus oli $18\text{ } \%$. Vastaavat ilman kosteuspitoisuudet ovat kuvan 8.X. mukaan noin $86\text{ } \%$ ja $77\text{ } \%$. Tuuletusraon yläosan puuanturin kosteuspitoisuus oli alaosaan pienempi, eli maksimissaan 22 vuorokauden kohdalla $15\text{ } \%$ ja kokeen lopussa $12\text{ } \%$ vastaten ilman kosteuspitoisuuksia $72\text{ } \%$ ja $65\text{ } \%$.

8.2.4.4. RAPP AUSPINNAN MUODONMUUTOKSET

Rakenteen ulkopinnan muodonmuutosten mittauspisteet ja vastaavat suurimmat muodonmuutokset ovat liitteessä 19. Kun ulkopinnan lämpötilamuutos oli suurimmillaan noin $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, oli sitä vastaava muodonmuutos $0,55\text{ mm/m}$. Muodonmuutosten suuruusluokassa ei ollut eroja seinän ylä- ja alaosan välillä.

Kokeessa käytettyjen levyjen korkeus oli 975 mm . Muodonmuutostuloksista saatu laajenemiskerroin lämpötila-alueella $-20 - +45\text{ }^{\circ}\text{C}$ on maksimissaan $0,0087\text{ mm/m}^{\circ}\text{C}$, ja tapahtunut muodonmuutos oli $0,06\text{ } \%$ levyn korkeudesta.

8.2.5. SAATUJEN TULOSTEN ARVIOINTI

Saatujen tulosten perusteella kokeessa tutkittu rakenneratkaisu soveltuu hyvin julkisivujen korjaus- ja lisäeristysmenetelmäksi. Rappaus kesti kokeen olosuhdevaihtelut rikkoutumatta. Käytännön olosuhteita ajatellen on syytä painottaa sitä, että kokeessa käytetyt levyt olivat todellisia levykokoja pienempiä, joten myös muodonmuutokset olivat pienempiä. Lisäksi ohuen rappauskerroksen halkeiluun vaikuttaa oleellisesti rappauksen ohjeiden mukainen koostumus silloin, kun rappaus sekoitetaan työmaalla.

Ulkonäkösyistä rappauksen suorittaminen kokeessa tehdyllä tavalla ei ole paras mahdollinen ratkaisu. Ohut pintarappaus, varsinkin kun rappaus levitetään ruiskun avulla, vaatii tasaisen rappauspohjan. Tästä syystä vahvistusrappaus ja lasikuituverkko tulisi ulottaa koko rapattavan seinän alueelle. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää peittävämpää pintarappausta tai levittää rappaus esim. lastan avulla. Suurella seinäpinnalla ruiskutusmenetelmä on kuitenkin nopeampi vaihtoehto. Kokeessa saumateipin käytöllä ei ollut vaikutusta rappausseaman kestävyYTEEN, sen sijaan saumateippi näkyi jonkin verran kohoumana pintarappauksen alla. Jatkossa tulisi tarkemmin selvittää saumateipin käytön merkitystä ja tarpeellisuutta saumattomaksi rapatussa levyrakenteessa.

Rapattu levyrakenne esti hyvin sadeveden tunkeutumisen rakenteeseen. Kokeessa tuli esille liityntädetaljien huolellisen suunnittelun ja asennuksen tärkeys. Alareunan suojana olleen pellin virheellisen rakenteen vuoksi vettä pääsi koeseinän alaosaan verhouslevyjen alareunan ja pellin välisestä saumasta. Asennuksen seurauksena pellin vaakasuora osa oli kallistunut osittain levyyn päin ja vesi pääsi sisempiin rakenteisiin.

Betonirakenteen ulkopuolisessa lämmöneristyksessä oli kokeen päätösvaiheessa jonkin verran ylimääräistä kosteutta, jonka määrä oli rakenteen alaosassa selvästi yläosaa suurempi. Kosteuden syynä oli rakenteen betonilaatta ja sen kuivuminen, vesivuoto seinän alaosassa sekä rakenteen lämpötilavaihteluiden aiheuttama tuuletusraon ilman vesihöyryn vuorottainen tiivistyminen ja kuivuminen. Koe lopetettiin pakkasjaksoon, jolloin rakenteen uloimmissa osissa ollut kosteus oli huurteena rakennekerrosten pinnoilla.

Pystykoolauksen puurakenteen suurempi kosteuspitoisuus seinän alaosassa yläosaan verrattuna johtui myös alareunan vesivuodosta. Kokeen loppua kohti suhteellinen kosteuspitoisuus tuuletusraon alaosassa nousi homehtumisen kannalta otolliselle alueelle, mutta muualla kosteuspitoisuudet pysyivät optimialueen ulkopuolella (kuva 8.7.). Kokeen perusteella rakenteessa käytettävä puumateriaali tulisi olla painekyllästettyä.

Tuuletusraon ilman kosteuden yläseinää suurempi arvo seinän alaosassa johtui rakenteen alareunan kostumisesta sekä lisäksi tuuletusraossa alhaalta ylös tapahtuvasta ilman liikkeestä. Ilmavirtauksen johdosta rakenne kuivui yläreunasta alareunaa tehokkaammin. Saatujen tulosten perusteella rakenne tuulettui, ja kosteuden kuivuminen käytännön tilanteessa olisi siten turvattu. Rakenteen tuuletus mahdollistaa myös lisäeristetyn pohjarakenteen kuivumisen.

Rakenteen lämpötekniisessä toimivuudessa ei havaittu ongelmia. Tehtyjen mittausten mukaan tutkittu seinärakenne, josta tosin puuttui sandwich-seinän sisäkuori, täyttää Suomen Rakentamismääräyskokoelmassa annetun k-arvovaatimuksen $< 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Kokeen aikana levysaumojen muodonmuutokset olivat odotetun suuruisia. BluCladin lämpölaajenemiskerroin lämpötila-alueella +20 - +100 °C on aiempien tutkimusten mukaan 0,0075 mm/m°C ja kosteuseläminen normaalioloista kyllästettyyn +0,1 %. Säärasituskokeessa muodonmuutokset johtuivat pääasiassa lämpötilan vaihteluista. Todellisessa seinärakenteessa levypituus maksimissaan on 2500 mm. Tällöin vastaava maksimimuodonmuutos olisi 1,41 mm. Saumarakenteen muodonmuutoskykyä alhaisissa lämpötiloissa ei ole erikseen tutkittu.

Käytetty koelaitteisto soveltui hyvin kokonaisen seinärakenteen toiminnan ja rappauksen kestävyys tutkimiseen säävaihtelujen alaisena. Tehdyssä kokeessa rasisussyklejä oli 64 kpl ja lisäksi lopussa viiden vuorokauden yhtenäinen pakkasjakso. Jäätymisen tapahtuessa seinä oli aina märkä, eikä rakenteen annettu kuivua sadetusten välillä. Todellisessa seinärakenteessa eivät olosuhteet ole näin ankarat, joten koetta voidaan pitää vaativana. Rasisussykliä määrän vastaavuutta ulkoilmassa tapahtuvaan säärasitukseen on hyvin vaikea arvioida, eikä kokeen avulla tule tulkita rakenteen kestävyttä todellisessa rakennuksessa vuosissa mitattuna.

8.3. KOETULOSTEN YHTEISTARKASTELU

Tehtyjen sadetus- ja säärasituskokeiden tulokset tutkituista julkisivunkorjausmenetelmistä olivat yhdensuuntaisia ja antoivat yhdessä hyvän kuvan rakenteiden sateenpitävyydestä ja toimivuudesta säänvaihtelujen alaisena.

Saumallisen levyverhouksen sateenpitävyys riippuu ratkaisevasti käytetystä kiinnitysmenetelmästä. Sekä sadetuskokeen että säärasituskokeen tulosten perusteella voidaan sanoa, että naulakiinnitys ei ole sopiva julkisivulevyjen kiinnitysmenetelmä, käytettiinpä sitten esiporattuja tai esiporaamattomia levyjä. Leveäkantaisten ruuvien soveltuvuus levykiinnitykseen oli hyvä käytettäessä ruuvin kannan alla EPDM-kumitiivistettä. Kokeiden mukaista avosaumarakennetta ei ole mahdollista saada täysin vesitiiviiksi. Sadevettä voi rakenteeseen päästä myös huonosti suunniteltujen ja asennettujen pellitysten kautta esim. ikkunoiden, räystäiden ja liikuntasaumojen kohdalla. Tästä syystä on varauduttava jonkinasteiseen kosteudenpääsyyn ulkoverhouksen taakse ja mahdollisen veden poistuminen levyseinän alareunassa on varmistettava huolellisella detaljien suunnittelulla. Lisäksi rakenteessa käytetty puutavara tulee olla painekyllästettyä.

Saumattomaksi rapattu BluClad-levyrakenne osoittautui molemmissa kokeissa vedenpitäväksi. Rappauksen halkeilua ei säärasituskokeessa esiintynyt, joten rappausmateriaalien elastisuus oli hyvä myös matalissa lämpötiloissa. Käytetyn levykoon ollessa normaalia levykokoa pienempi ei rappauspinnan toimivuutta voida täysin varmistaa ilman rappausmaunojen muodonmuutoskykyä mittaavaa tutkimusta. Tehtävä tutkimus voisi olla yksinkertainen saumojen nykityskoe eri lämpötiloissa tai sitten täyden mittakaavan tutkimus todellisissa sääolosuhteissa kokonaisia levyjä käyttäen.

Säärasituskokeen perusteella tutkitun tuuletusrakomallin voidaan katsoa toimineen rakennetta kuivattavasti. Rakenteiden kuivuminen edellyttää kuitenkin sadeveden pääsyn estämistä verhoukslevyjen taakse huolellisella detaljisuunnittelulla.

Lisälämmöneristyksellä aikaansaatii hyvin lämpöä eristävä seinärakenne. Korjattavan seinän pakkasrasitus väheni lisäeristuksen myötä huomattavasti. Todellisessa rakennuksessa vanhan seinän lämpötilan voidaan arvioida vaihtelevan 0 °C:n jäätymislämpötilassa vain alhaisilla alle

-10 °C lämpötiloilla ja silloinkin vain silloin, kun pakkasjakso kestää yli vuorokauden. Korjaamattoman seinän pinnan lämpötila vaihtelee suoraan ulkoilman lämpötila- ja säteilyolojen mukaan.

Säärasituskokeen muuttuvan säärasituksen aikana koeseinien betonilaatan ulkopintojen lämpötilat olivat lähes saman suuruisia riippumatta käytetystä lämmöneristeestä (50 mm paksulla pehmeällä lasivillalla ja tuulensuojalevyllä +8 °C ... +12 °C ja 30 mm paksulla muovikuitukankaalla päällystetyllä jäykällä lasivillalla +5 °C ... +12 °C). Tulosten perusteella korjausrakenteessa voidaan käyttää kumpaa tahansa lämmöneristysratkaisua.

Laboratoriokokeiden aikana otetuista valokuvista on tehty tässä työssä esiintyvää kuvamateriaalia laajempi kuvasarja, joka on Lemminkäinen Oy:n Kattoyksikössä DI Ari Junttilalla.

9. ESIMERKKIKOHTTEEN JULKISIVUKORJAUKSEN VAIHTOEHDOT

Tässä luvussa esitetään diplomityössä esille tulleiden asioiden pohjalta kaksi julkisivun korjausvaihtoehtoa esimerkkikohteeksi valittuun elementtirakenteiseen kerrostaloon. Toinen korjausvaihtoehto on saumallinen levykorjaus Masterstone-julkisivulevyllä ja toinen on rapatuilla BluClad-levyillä toteutettu rakenne. Molemmat korjausvaihtoehdot sisältävät lisälämmöneristeen asentamisen.

Luvussa on käyty läpi valittujen korjausvaihtoehtojen rakenneratkaisut ja tärkeimmät seinärakenteen toimintaan vaikuttavat ominaisuudet.

9.1. TIETOJA ESIMERKKIKOHTTEESTA

Korjattavaksi esimerkkikohteeksi on valittu kuvassa 4.1. oleva 1960-luvulla rakennettu lamellitalo, joka sijaitsee Jyväskylässä. Talon kantavana runkona on paikallavaletut betoniset väliseinät ja välipohjat sekä päädyn kantavat sandwich-elementit. Rakennus on perustettu kallion varaan anturoille. Ulkoseinät ja parvekkeet ovat elementtirakenteisia ja ulkoseinät ovat pääosin pesubetonipintaisia. Rakennuksessa on yksi liikuntasäilytysaukko pitkän sivun keskikohdassa.

Korjaus koskee asuinkerrosten seiniä muutoin paitsi parvekkeen osalta. Päädyn kantavien sandwich-elementtien rakennepaksuudet ovat seuraavat:

- ulkokuori 45 - 60 mm
- lämmöneriste 110 mm
- sisäkuori 150 mm

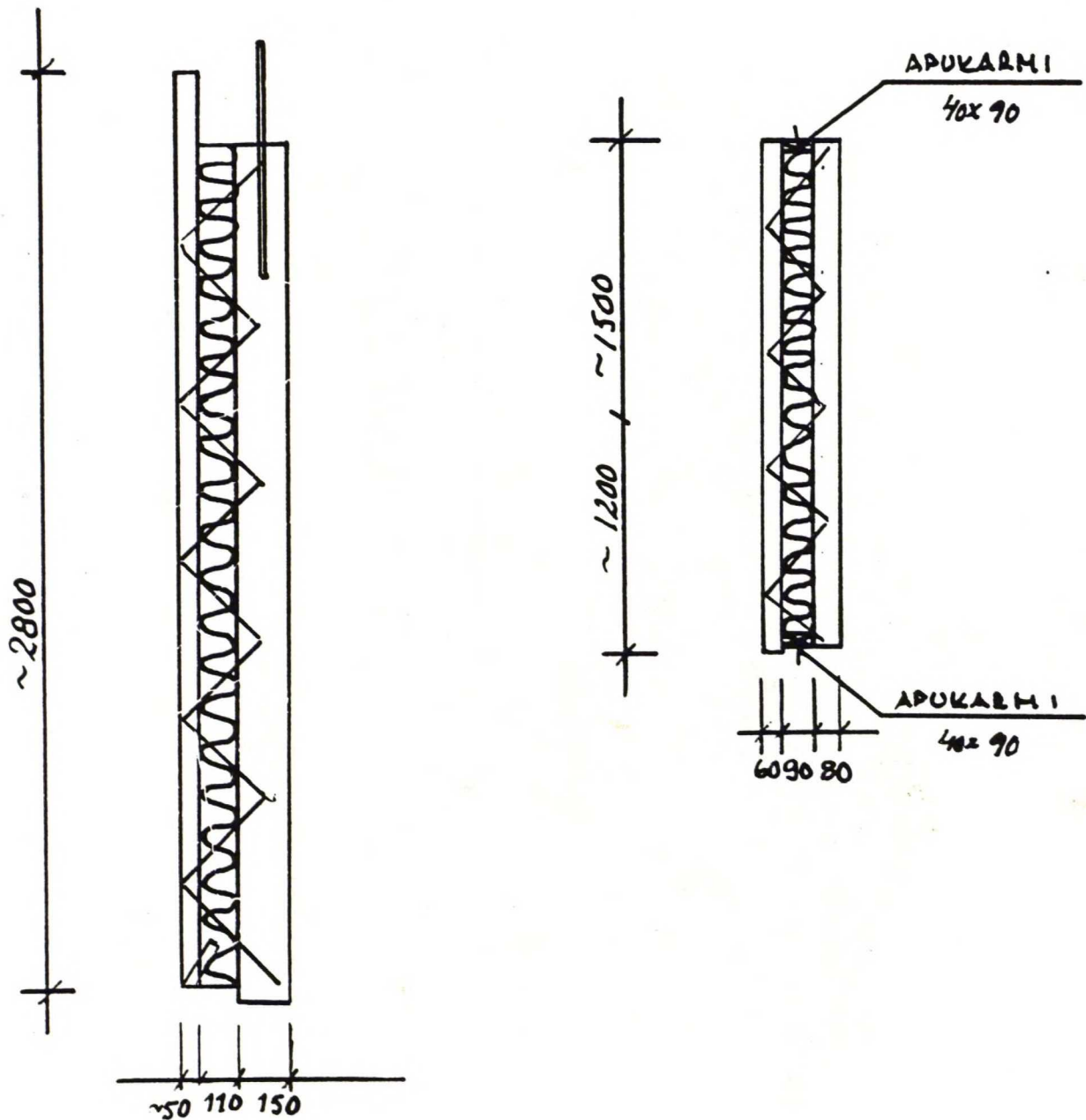
Pitkillä sivuilla olevat kantamattomat nauhaelementit kannatetaan kantavasta väliseinistä ns. puukkokannatuksella elementtien yläkulmista. Elementtien rakennepaksuudet ovat:

- ulkokuori 60 mm yleensä
- lämmöneriste 90 mm
- sisäkuori 80 mm

Sandwich-elementeissä on käytetty 5 mm ruostumattomia diagonaaliakseleita 600 mm jaolla. Teräslaatu on todennäköisesti SIS 2330. Elementtien poikkileikkaukset näkyvät kuvassa 9.1.

Ikkunoiden ala- ja yläpuolella elementeissä on yhtenäinen painekyllästetty apukarmi. Ikkunan yläpuolella ulkokuori tulee ikkunan karmin eteen n. 20 - 25 mm. Kallistusta tai tippauraa ei ole.

Käytetty betoni on suojahuokoistamatonta. Eteläpäädyn elementeissä on silminhavaittavia pakkasvaurioiden aiheuttamia halkeamia ja elementtien reunoissa pitkälle rapautunutta betonia. Ulkokuoren karbonatisoitumissyvyys ulko- ja sisäpinnalla on alle 5 mm. Raudoitteet sijaitsevat keskimäärin 30 mm etäisyydellä etupinnasta, joten välitöntä korroosiovaaraa ei ole. Muiden julkisivujen pakkasvauriot ovat vähäisempiä ja karbonatisoituminen vastaa eteläpäädyn tilannetta.

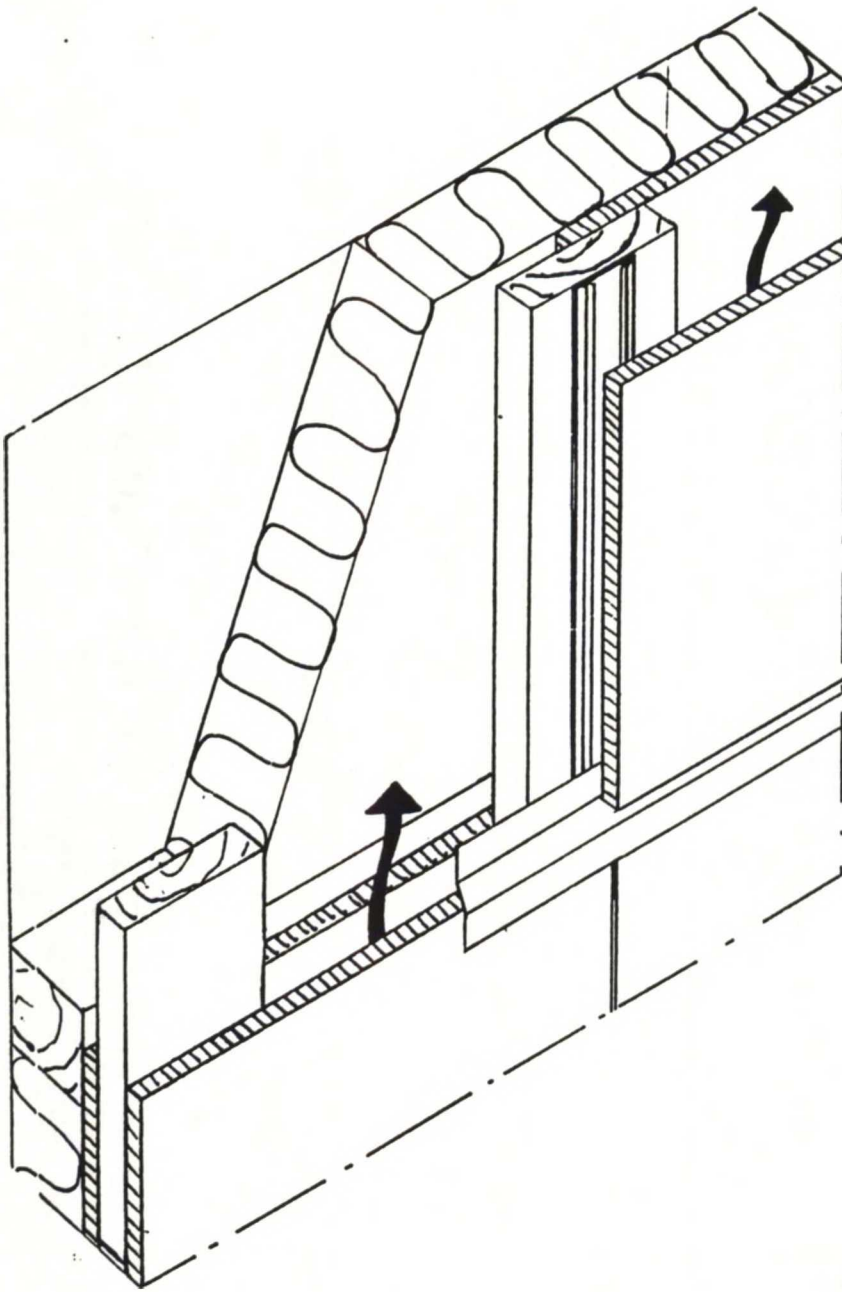


Kuva 9.1. Kantavan sandwich-elementin ja sandwich-nauhaelementin poikkileikkaukset.

9.2. JULKISIVUKORJAUS MASTERSTONE-LEVYILLÄ

9.2.1. RAKENNE JA MATERIAALIT

Julkisivun korjausrakenteena on saumallinen levyrakenne, joka toteutetaan kuvan 9.2. mukaisesti tuuletusraollisena ja lisäeristettynä puista ristikoolausta käyttäen.



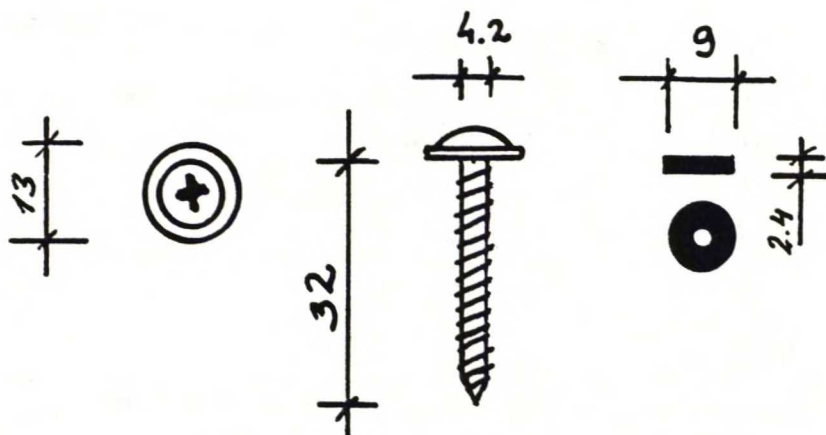
Kuva 9.2. Poikkileikkaus julkisivuun asennettavasta korjausrakenteesta.

Verhouslevyinä käytetään kivipintaisia 8 + 2 mm paksuja Masterstone-julkisivulevyjä, jotka leikataan valmiiksi tehtaalla ennen kivirouheen kiinnittämistä levykoosta 3000 x 1200 mm. Päätyseinille tulevien levyjen peruskoko on 2790 x 1200 mm (kerroshkorkeus 2800 mm). Parvekejulkisivussa ikkunaväli on 1200 mm, jolloin levyt asennetaan vaakasuuntaan, ja vastakaisella pitkällä sivulla ikkunavälin ollessa 1500 mm peruslevyko on 1500 x 1200 mm.

Levyt varastoidaan työmaalla vaakatasossa tasaisella alustalla siten, että leveyssuuntaiset alustet sijaitsevat vähintään metrin välein. Ulkotiloissa levyt varastoidaan peitettynä.

Peruskokoja pienemmät levykoot leikataan työmaalla kovapalateräisellä leikkurilla. Leikkaus tapahtuu aina levyn takapuolelta. Levyihin esiporataan ruuvinreiät 5,5 mm kovametalliterällä, johon on kiinnitetty 9 mm jyrsin. Jyrsimen avulla tasoitetaan levyn pinta ruuvinkannan alueelta poistamalla kivirouhe epoksihartsikerrokseen asti.

Masterstone-levyt kiinnitetään pystykoolaukseen kuvan 9.3. mukaisilla haponkestävillä levyn värisiksi maalatuilla ruuveilla, joissa ruuvikannan alla on EPDM-kumitiiviste.



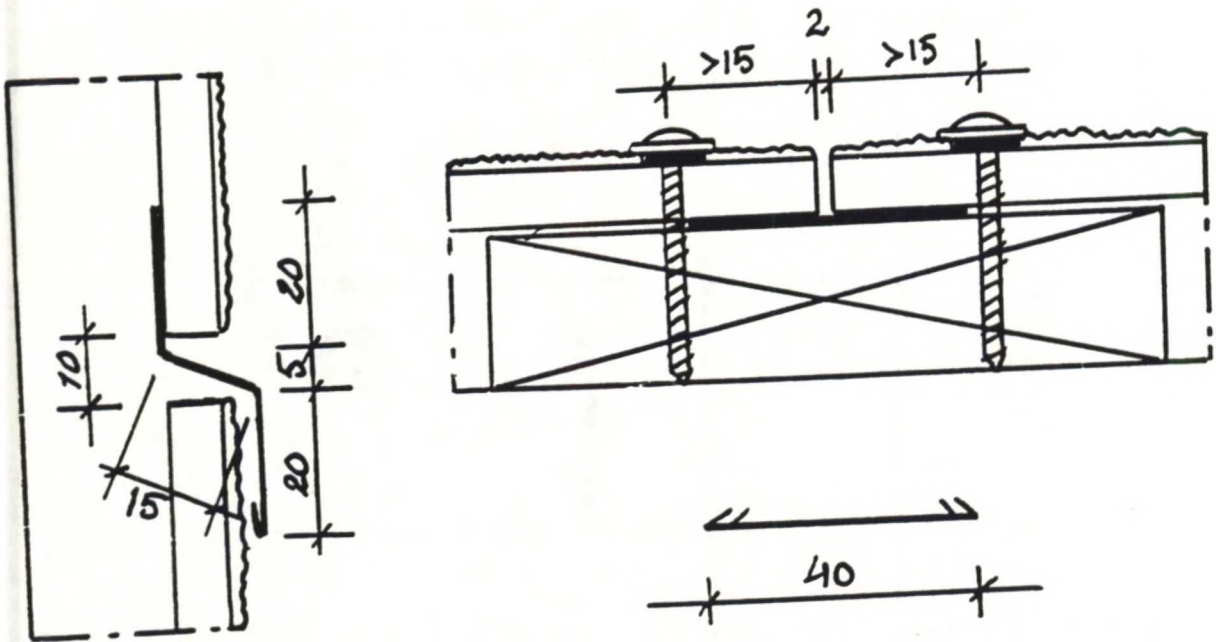
Kuva 9.3. Masterstone-levyjen kiinnitykseen käytettävän ruuvin ja eristeen rakenne.

Kiinnitysväli pystykoolauksien kohdalla on asennusohjeen mukaisesti 250 mm sekä levyn reunoissa että keskellä. Vaakasaumojen kohdalla levyt kiinnitetään myös pystykoolauksien välissä sijaitseviin tukipuihin. Kiinnikkeiden etäisyys levyn reunasta on 20 ± 5 mm ja levyn nurkasta 40 ± 5 mm. Asennusohjeissa annettu minimietäisyys levyn reunasta on 15 mm ja levyn nurkasta 35 mm.

Levysaumat toteutetaan avosaumaisina. Saumojen leveydet ja saumakappaleiden dimensiot näkyvät kuvassa 9.4. Pystysaumassa levyn takana käytetään EPDM-kumikaistaa, joka kiinnitetään pystypuuhun niiteillä. Kumikaistaa ei saa asennuksen yhteydessä venyttää. Vaakasaumoissa käytetään levyn värisiksi pinnoitettua metalliprofiilia. Vaakasaumalista kiinnitetään pystypuiden kohdalta leveäkantaisilla nauloilla.

Tukirakenteena toimiva ristikoolaus tehdään painekyllästetystä ja kuivatusta puusta. Verhouslevyjen takana olevaan pystykoolaukseen käytetään 19 x 100 mm lautaa k 600 ja vaakakoolaukseen 50 x 50 mm rimaa k 600. Levyjen vaakasaumat tuetaan koolausten väliin asennetuilla 19 x 100 x 200 mm tukikappaleilla.

Lämmöneristeenä käytetään 50 mm paksua pehmeätä mineraalivillaa, joka sijoitetaan vanhan seinärakenteen päälle vaakakoolausten väliin. Lämmöneriste suojataan ilmvirtauksilta eristeen päälle asennettavalla tuulensuojalevyllä. Tuulensuojalevyjen saumat sijoitetaan puukoolausten päälle, ja levysaumoihin liimataan kuituvahvisteinen Tyvec-teippinauha.



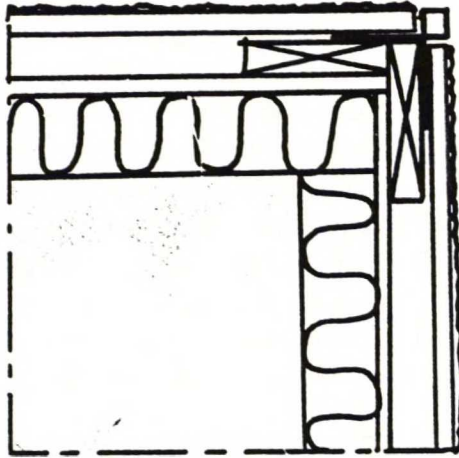
Kuva 9.4. Masterstone-levyrakenteen pysty- ja vaakasauman rakenne ja saumoissa käytettyjen osien dimensiot.

Korjausrakenne kiinnitetään vanhaan seinään lyöntiankkureilla. Lyöntiankkureiden tartuntavetolujuudet määritetään erikseen julkisivukohtaisesti kantaville ja ei-kantaville sandwich-elementeille. Eteläpäädyssä korjausrakenne kiinnitetään sandwich-elementin sisäkuoreen ja pohjoispäädyssä osa kiinnikkeistä ulotetaan sisäkuoreen ja osa ulkokuoreen. Pitkillä sivuilla korjausrakenteen kuormat viedään kantaville rakenteille ulottamalla kiinnikkeet kantavan väli-seinän ja laatan kohdalla kantavaan rakenteeseen asti. Muutoin kiinnitys tehdään elementin sisäkuoreen.

Vaakakoolauksia kiinnitettäessä vanhan seinäpinnan epätasaisuus huomioidaan ja suoritetaan seinälinjat puurimojen alle sijoitettavien kiilojen avulla. Jos elementtien välille on syntynyt selviä porrastuksia, ne tasoitetaan sementtilaastin avulla, jotta lämmöneristeen ja vanhan seinäpinnan väliin ei jää ilmavirtauksia aiheuttavia rakoja.

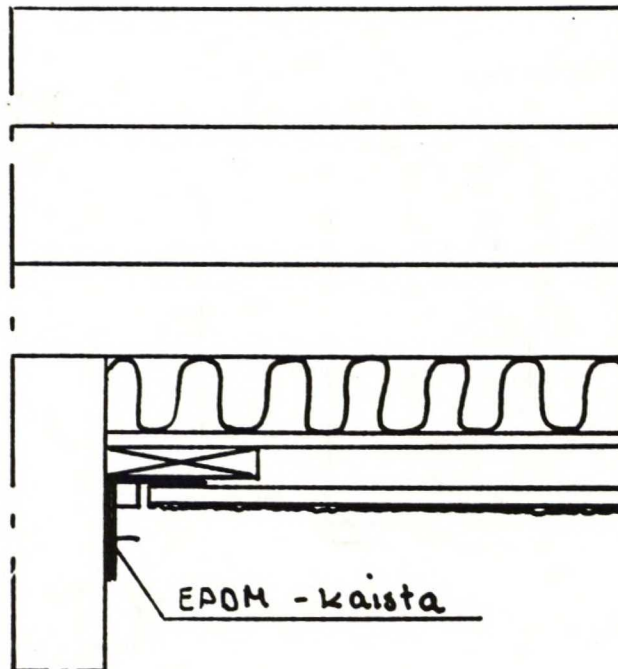
9.2.2. LIITTYMÄDETALJIT

Rakennuksen ulkonurkissa levysauma toteutetaan avonaisena käyttäen erillistä levyn väriseksi pinnoitettua metalliosaa. Masterstone-levyn pään ja kulmaosan väliin jätetään 2 mm liikkumavara. Nurkan rakenne on kuvassa 9.5.



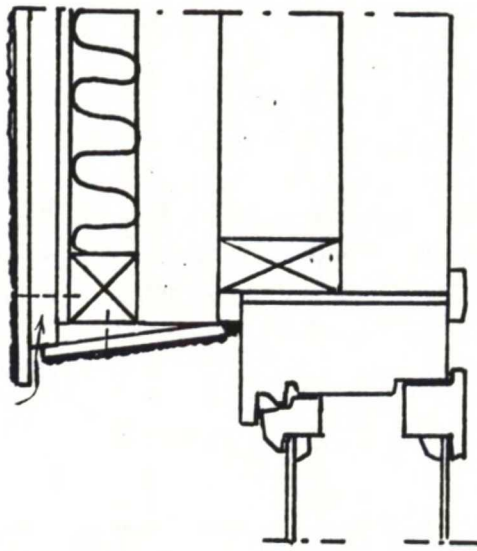
Kuva 9.5. Ulkonurkan rakenne.

Korjattavan seinäpinnan ja parvekeseinän välinen kulma tehdään kuvan 9.6. mukaisesti. Liitoskohdassa käytetään levyn väriiseksi pinnoitettua normaalisti sisänurkissa käytettyä metalliosaa. Levyn pään ja kulmaosan väliin jätetään 2 mm liikkumavara. Parvekeseinän pinnan ja kulmapalan väliin asennetaan EPDM-kumikaista vedeneristyksen varmistamiseksi.

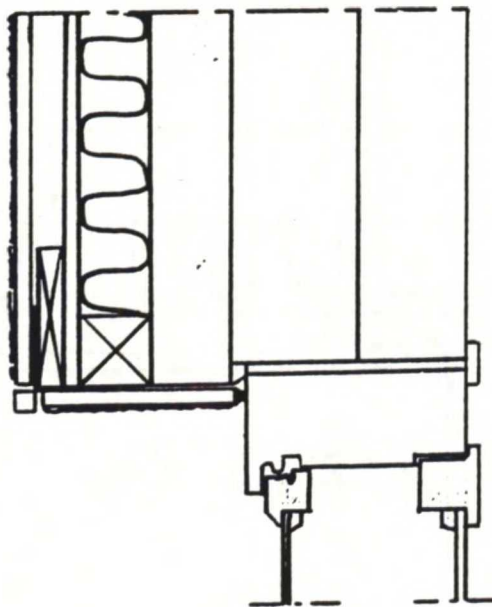


Kuva 9.6. Korjattavan seinäpinnan ja parvekeseinän välisen kulman rakenne.

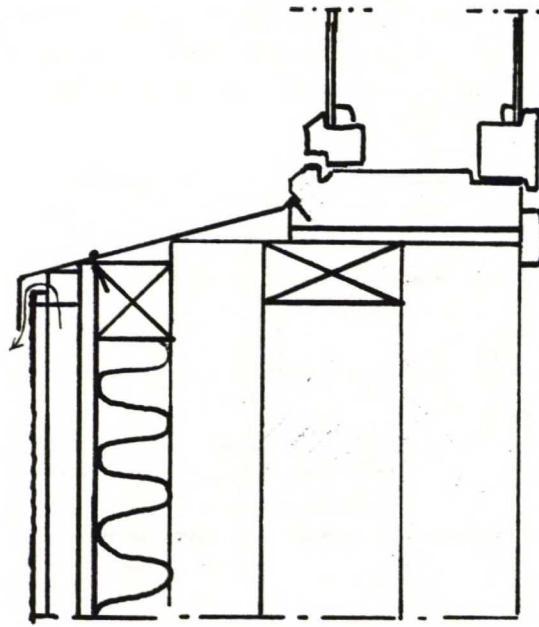
Ikkunapielet tehdään Masterstone-levystä kuvien 9.7. - 9.9. mukaisesti. Yläpielen vaakarakenteeseen tehdään kallistus ulospäin mahdollisen tuuletusraossa olevan veden poispääsyn mahdollistamiseksi. Yläpielen Masterstone-levy tuetaan vinoksi leikattujen pystykoolausten alapäiden varaan. Yläpielilevyn pään ja julkisivulevyn väliin jätetään 5 mm rako, jotta tuuletusrakoon aikaansaadaan riittävä tuuletus. Yläpielilevyn ja ikkunakarmin välinen sauma tiivistetään elastisella levyn värisellä silikonimassalla. Ikkunan sivupielen ja julkisivupinnan välisessä kulmassa käytetään samanlaista rakennetta kuin ulkonurkissa. Pielilevyn ja ikkunankarmin välinen sauma tiivistetään yläpielen tapaan silikonimassalla. Ikkunapelti tehdään pinnoitetusta muotopelistä. Ikkunan alapuolisen Masterclad-levyn pään ja ikkunapellin väliin jätetään 10 mm rako ja pellin tippanokka on 10 mm irti levyn pinnasta. Tippanokan alareuna sijaitsee 20 mm levyn yläreunan alapuolella. Ikkunapellin liittyminen ikkunapieliin tehdään siten, että pelti asennetaan pielilevyn reunan alle taittuen ylöspäin levyn takapintaa pitkin.



Kuva 9.7. Ikkunan yläpielen rakenne.

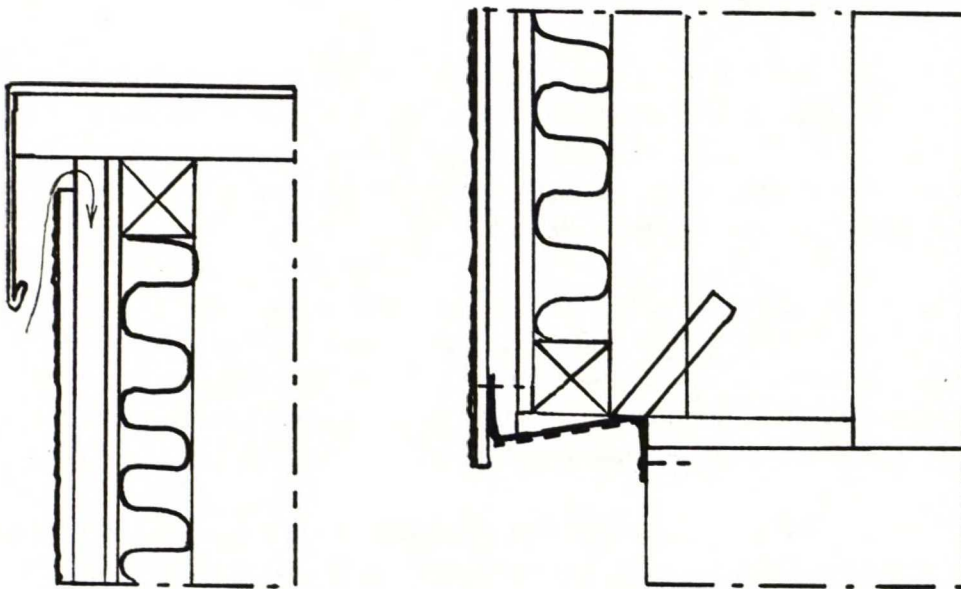


Kuva 9.8. Ikkunan sivupielen rakenne.



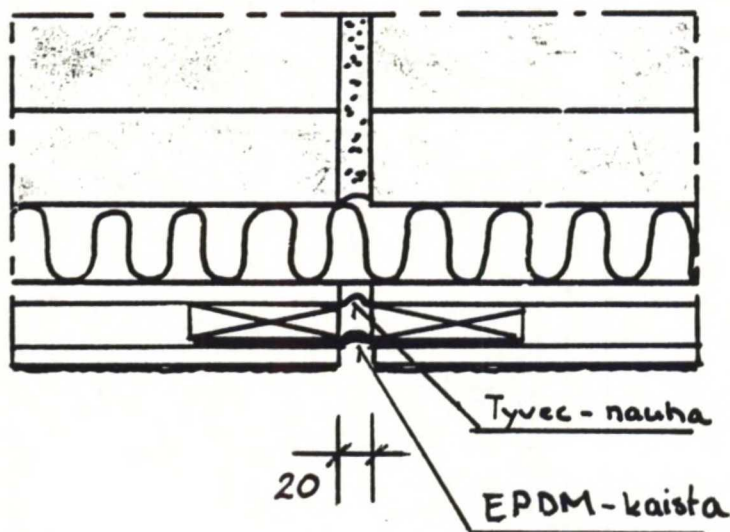
Kuva 9.9. Ikkunan alapielen rakenne.

Seinän yläosan liittyminen räystäääseen sekä seinän ja sokkelin liittymä tehdään kuvan 9.10. mukaisesti. Räystäään alla Masterstonen ja räystääspuun välinen rako on 20 mm. Räystäään nokan ja levypinnan väli on 20 - 30 mm ja nokan alareuna sijaitsee n. 80 mm levyn yläreunan alapuolella. Seinän ja sokkelin liittymässä valmiin reikäpellin reikämäärä on 25 %. Peltiin tehdään kallistus ulospäin, ja kallistuksen toteutuminen varmistetaan tukemalla pelti pystykoolauksen vinoksi muotoiltuun alapäähän.



Kuva 9.10. Seinän yläosa ja sokkeliliittymä.

Rakennuksen pitkän sivun keskikohdassa sijaitsevan liikuntasauman rakenne on esitetty kuvassa 9.11. Liikuntasauman kohdalla tuulensuojalevyjen välisessä saumassa on kuituvahvistein Tyvec-teippi, johon jätetään liikkumavaraa vaakasuoria liikkeitä varten. Julkisivulevyjen ja pystykoolausten väliin asennetaan n. 200 mm leveä EPDM-kumikaista, johon jätetään myös liikevaraa.



Kuva 9.11. Liikuntasauman rakenne.

9.2.3. MEKAANINEN TOIMIVUUS

Jyväskylässä esimerkkikohteen korkuiselle rakennukselle tuulenpaine $q_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$, ja painekerroin $\mu = 1,0$. Staattinen tuulikuorma on luvussa 5.2.2. olleen kaavan 5.1. mukaan $0,65 \text{ kN/m}^2$. Taulukon 5.5. mukaan 600 mm tukiväli on riittävä varmistamaan 10 mm paksujen levyjen kestävyys tuulikuormia vastaan.

Korjausrakenteen kiinnikkeiden mitoituksessa kuormina otetaan huomioon rakenteen painosta aiheutuva kuorma sekä tuulesta aiheutuva imukuorma. Korjausrakenteen paino on n. 32 kg/m^2 ja tuulesta aiheutuva mitoittava imukuorma lähteen /33/ mukaan $0,59 \text{ kN/m}^2$. Vanhaan seinään tulevien kiinnikkeiden tartuntavetolujuuksien mittaustulosten perusteella kiinnikkeiden määrä valitaan riittäväksi varmuuskertoimen ollessa luokkaa 2,5.

Luvussa 5.2.2. esitetyn levyrakenteen tuulen aiheuttaman imukuorman kestävyyskokeen perusteella nähdään, että levyjen kiinnitysväli 250 mm on riittävä varmistamaan rakenteen kestävyys esimerkkikohteessa esiintyvää tuulen imukuormaa vastaan. Kokeessa ei tutkittu yhtään aivan samanlaista rakennetta kuin tässä on käytetty, mutta kaikilla tutkituilla rakenteilla saadut maksimikuormat olivat yli satakertaisia esimerkkikohteen imukuormaan verrattuna.

Esimerkkikohteessa julkisivukorjaus ei koske alinta kerrosta eikä parvekeseiniä, joten korjausrakenteen iskunkestävyys ei ole kovinkaan merkittävä tekijä rakenteiden suunnittelussa. Kuitenkin käytetyn 10 mm paksun Masterstone-levyn iskunkestävyys on hyvä, ja luvussa 5.2.4. esitetyn Mastercladin iskutkeys-kokeen perusteella myös 10 mm paksua Masterstonea voidaan iskunkestävyytensä puolesta käyttää esim. kerrostalojen alimmissa kerroksissa ja parvekkeissa,

kun tukiväli on 600 mm. Tämä on hyvä tietää, jos myöhemmin halutaan korjata myös nämä osat rakennuksen julkisivusta.

Esimerkkikohteessa käytetyt ja kuvassa 9.4. esitetyt levyjen saumaleveydet 2 mm ja 10 mm ovat luvun 5.2.5. mukaisesti riittävän suuria vastaanottamaan levyjen lämpö- ja kosteus-elämisestä johtuvat liikkeet, sillä levyn maksimikosteuseläminen leveyssuuntaan on 1,2 mm ja pituussuuntaan alle 3 mm.

9.2.4. RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

Esimerkkikohteessa Masterstone-levyjen kiinnitysmenetelmä on valittu luvussa 7.1. esitetyn sadetuskokeen perusteella. Kokeessa tutkitut muut kiinnitysvaihtoehdot, jotka olivat naulaus esiporauksella ja naulaus ilman esiporausta, aiheuttivat vesivuotoja rakenteeseen, kun taas valitulla vesieristetyllä ruuvikiinnitysmenetelmällä vesivuotoja ei tapahtunut. Sadetuksen aikana levyjen avosaumoista ja yksittäisistä ruuvinrei'istä kosteutta imeytyi levyjen takapintaan vähäisiä määriä, joten kokonaisuudessaan valitun levyrakenteen sateenpitävyyttä voidaan pitää hyvänä. Sadetuskokeessa käytetyn vaakasaumalistan tippanokan dimensiot olivat edulliset sateenpitävyyttä ajatellen. Liian lyhyt tippanokka voi aiheuttaa sadeveden pääsyn rakenteeseen, joten vaakasaumalistana käytettävän metalliprofiilin tulee olla kuvassa 9.4. olevien mittojen mukainen.

Luvun 8.1. säärasituskokeessa nähtiin liittymädetaljiin tärkeä merkitys seinä rakenteen sateenpitävyyden kannalta. Esimerkkikohteen liittymädetaljiin suunnittelussa on ratkaisujen sateenpitävyyden lisäksi otettu huomioon mahdollisen kondenssiveden poispääsy rakenteesta.

Korjattavien seinä rakenteiden lämmönläpäisykertoimet ennen lisäeristystä ovat taulukon 3.2. mukaisesti n. $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$. Seinien lämmöneristyskykyä parannetaan ulkopuolisella lisälämmöneristyksellä vastaamaan Srmk:n k-arvovaatimusta $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Valitaan lämmöneristeeksi pehmeä mineraalivilla, jolloin taulukon 5.8. perusteella tarvittava lisäeristyspaksuus on 50 mm.

Lisälämmöneriste on asennettava siten, että se täyttää koko eristeelle varatun tilan vaakakoolauksien välissä. Vanhan seinän ja lämmöneristeen väliin ei myöskään saa jäädä ilmarakoa, sillä rakoon syntyvät ilmavirtaukset huonontaisivat seinän eristyskykyä.

Rakenteeseen tuulensuojalevyn ja Masterstone-levyjen väliin jätetään 20 mm leveä tuuletusrako. Liittymädetaljit on suunniteltu siten, että raon päiden muotoilu vastaa kuvassa 5.14. esitettyä rakomallia, joten tuuletusrako toimii lämpötekniisesti luvussa 5.3.2. esitetyllä tavalla. Tällöin tuuletusraon keskimääräisenä parantavana vaikutuksena seinä rakenteen k-arvoon voidaan pitää rakennuksen päätyseinillä n. $0,030 \text{ W/m}^2\text{K}$ (yhden kerroksen korkuinen tuuletusrako) ja pitkillä sivuilla n. $0,025 \text{ W/m}^2\text{K}$ (tuuletusraon korkeus vastaa ikkunoiden pystysuoraa etäisyyttä). Luvun 3.2.1. mukaan rakenteessa olevat kylmäsiilat mitätöivät lisäeristämisen teoreettisesta eristysvaikutuksesta n. 20 - 50 %, joka tässä tapauksessa vastaa k-arvon alennusta $0,018 - 0,045 \text{ W/m}^2\text{K}$. Puukoolauksia käytettäessä k-arvon alennus lienee lähempänä 20 % kuin 50 %. Koska tuuletusraon ja kylmäsiiltojen keskenään päinvastaiset vaikutukset ovat samaa suuruusluokkaa, voidaan näiden katsoa kumoavan toisensa ja käyttää seinä rakenteen k-arvona lisäeristyksellä saavutettavaa k-arvoa $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Luvussa 5.3.3. käsiteltiin kyseisen tuuletusrakomallin kosteudenpoistokykyä, ja se todettiin riittäväksi normaaliolosuhteissa sekä myös korjattavan seinärakenteen ollessa korjaushetkellä märkä. Jos tuuletusrakoon ei diffuusion lisäksi siirry sisäilmasta kosteutta muulla tavoin, pystyy kolmen kerroksen korkuinen (8,4 m) tuuletusrako maksimissaan poistamaan ulkoa päin tulevaa kosteutta vastaten n. 10×10^{-8} kg/m²s kosteusvirtaa. Esimerkkirakenteen kannalta tämä kosteudenpoistokyvyn arvio on varmalla puolella, sillä avonaisten levysaumojen kautta kulkevat ilmavirtaukset parantavat tuuletusraon tuulettuvuutta ja kosteudenpoistokykyä. Luvun 7.1. sadetuskokeen perusteella tiivistetyllä ruuvikiinnityksellä toteutetun rakenteen kosteuskertymä pitkällä aikavälillä jää poistuvan veden määrää pienemmäksi, kun taas muilla kokeessa tutkituilla kiinnitysratkaisuilla rakenteeseen päässyt vesimäärä olisi moninkertainen tuuletusraon kosteudenpoistokykyyn nähden.

9.2.5. MUUT OMINAISUUDET

Masterstonen pohjalevynä olevalla Masterclad-levyllä tehty pakkasen- ja kosteusvaihtelujen kestävyyskokeet ja muut luvussa 5. esitetyt tutkimukset mm. levyn biologisesta kestävyydestä ovat olleet pohjana sille, että Mastercladille Englannissa myönnetyssä sertifikaatissa on arvioitu levyjen eliniän ylittävän julkisivulevyille vaadittavan 30 vuotta. Masterstonessa oleva kivirouhepinnoitus ei ainakaan lyhennä levyn elinikää, joten Masterstonen pitkäaikaiskestävyys lienee vähintään samaa luokkaa.

Masterstone-levyn kivirouhepinta on karkea ja vaaleat värit saattavat olosuhteista riippuen likaantua epätasaisesti. Pinta voidaan kuitenkin pestä painepesurilla ja miedolla pesuaineella. Värien pysyvyys on luonnonkivipinnan ansiosta hyvä. Levyjen uusiminen tarvittaessa on helppoa varsinkin esimerkkikohteen ruuvikiinnitystä käytettäessä, tosin värieroa vanhoihin levyihin verrattuna tulee luultavasti esiintymään käytetyn luonnonkivirouheen väri vaihtelujen vuoksi.

Masterstone-levykorjaus täyttää luvussa 4.8. esitetyt julkisivurakenteen palonkestovaatimukset Suomessa. Levymateriaali itsessään on palamatonta. Tuuletusraollisen rakenteen paloturvallisuutta on tarkemmin käsitelty luvussa 5.5.

9.2.6. KORJAUSKUSTANNUKSET

Luvussa 4.7. on laskettu esimerkkitalolle yksikkökustannukset erilaisilla kevytrakenteisilla julkisivukorjausmenetelmillä. Kustannukset on laskettu Helsingin hintatason mukaan, mutta julkisivukorjauksen kustannusten suuruusluokkaa arvioitaessa voidaan näitä saatuja kustannuksia käyttää.

Kustannusvertailussa mukana olevan Masterstone-levyrakenteen kustannukset on laskettu tässä esimerkissä ristikoolauksella ja 50 mm lisäeristyksellä toteutetun korjausrakenteen perusteella. Yksikkökustannusten erittely on esitetty liitteen 2 taulukossa 1. Yksikköhintalaskelmien avulla saatu rakentamiskustannus Masterstone-levykorjaukselle on 462 mk/m², josta hankintakustannukset olivat 168 mk/m² ja työkustannukset sosiaalikuluneen 188 mk/m². Työmaan yhteiskustannuksiksi ja urakoitsijan yleiskustannuksiksi on arvioitu 30 % välittömistä kustannuksista, eli 107 mk/m².

Kustannukset eivät sisällä mittauksia, eivätkä työmaakohtaisesti tehtäviä kiinnikkeiden vetokokeita ja valintaa. Rakennuttajakulut eivät myöskään sisälly laskelmiin. Näitä ovat mm. suunnittelu-, rahoitus-, valvonta- ja hallintokulut. Ne vaihtelevat suuresti suunnittelun tasosta,

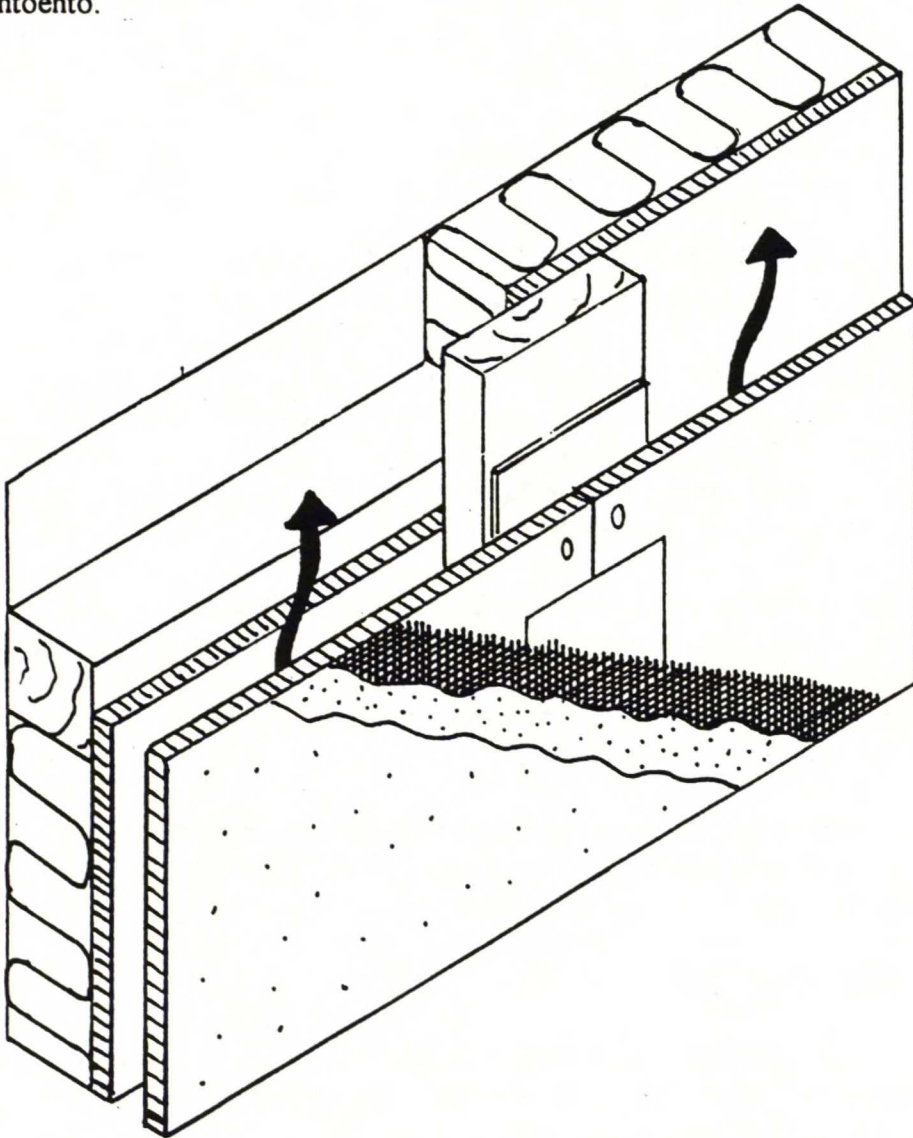
suhdanteista ja rakennuttajan organisaatiosta riippuen ollen 3 - 20 % rakentamiskustannuksista. Saatu yksikköhinta vastaa siis kohteen urakoitsijakustannuksia.

Verrattaessa Masterstone-levyillä tehdyn julkisivukorjauksen kustannuksia muiden kevyt-rakenteisten julkisivukorjausten kustannuksiin (taulukko 4.2.), nähdään, että korjauskustannukset ovat hiukan pienemmät kuin kaikkien menetelmien kustannusten avulla laskettu keskiarvo, joka on n. 490 mk/m². Masterstone-levykorjausta voidaankin pitää hinnaltaan kilpailukykyisenä esimerkkijulkisivun korjausvaihtoehtona.

9.3. JULKISIVUKORJAUS RAPATUILLA BLUCLAD-LEVYILLÄ

9.3.1. RAKENNE JA MATERIAALIT

Julkisivun korjausrakenteena on saumattomaksi rapattu levyrakenne, joka toteutetaan kuvan 9.12. mukaisesti tuuletusraoillisenä ja lisäeristettynä puista ristikoolausta käyttäen. Vanhasta seinästä pystykoolaustiin asti rakenne on siis samanlainen kuin Masterstone-levyillä toteutettu korjausvaihtoehto.



Kuva 9.12. Poikkileikkaus julkisivuun asennettavasta korjausrakenteesta.

Korjausrakenteessa rappauksen pohjalevyinä käytetään mikrosilikoniemulsiolla pintakäsiteltyjä BluClad-julkisivulevyjä, joiden paksuus on 10 mm. Levykoko on 1220 x 2500 mm ja levyt tulevat työmaalle kokonaisina. Tarvittavat pienemmät levykoot katkaistaan työmaalla.

Rappauspinnan alle jäävät levyreunat voidaan katkaista taivuttamalla viiltojälkeä pitkin suoraa kulmaa vasten. Koneellisessa sahauksessa käytetään volframikarbidi- tai timanttiterää. Katkaisu-
tut levyreunat voi tarvittaessa tasoittaa hiekkapaperilla, raspilla tai viilalla. Jos levyjen työstö tapahtuu sisätiloissa, järjestetään pölynpoisto kohdeimurilla.

Levyt varastoidaan työmaalla vaakatasossa tasaisella alustalla siten, että leveyssuuntaiset alustet sijaitsevat vähintään metrin välein. Ulkotiloissa levyt varastoidaan peitettynä.

Tukirakenteena toimiva ristikoolaus tehdään painekyllästetystä ja kuivatusta puusta. Verhouslevyjen takana olevaan pystykoolaukseen käytetään 19 x 100 mm lautaa k 600 ja vaakakoolaukseen 50 x 50 mm rimaa k 600. Levyjen vaakasaumat tuetaan koolauksen väliin asennetuilla 19 x 100 x 200 mm tukikappaleilla.

BluClad-levyt kiinnitetään pystykoolaukseen ilman esiporausta haponkestävillä 4,2 x 25 mm uppokantaruuveilla. Kiinnitysväli pystykoolauksien kohdalla on taulukon 6.1. mukaisesti 400 mm sekä levyn reunoissa että keskellä. Vaakasaumojen kohdalla levyt kiinnitetään myös pystykoolauksien välissä sijaitseviin tukipuihin. Kiinnikkeiden etäisyys levyn reunasta on 20 ± 5 mm ja levyn nurkasta 40 ± 5 mm. Asennusohjeissa annettu minimietäisyys levyn reunasta on 12 mm.

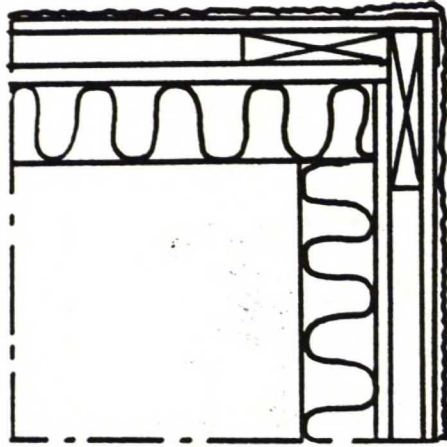
Levyt asennetaan siten, että pintakuvioitu puoli muodostaa rappauspohjan, ja sileä puoli on tuuletusrakoon päin. Levysaumot toteutetaan puskusaumoina. Pystykoolauksen ja levyjen takapinnan väliin asennetaan n. 80 mm leveä EPDM-kumikaista kuvan 9.12. mukaisesti. Levyjen kiinnittämisen jälkeen levysaumojen päälle lisätään 66 mm leveä Simplex-teippi (Tyvec-teippi), joka on valmistettu kuituvahvisteisesta paperista. Teippi kiinnittyy levyihin kahden liimaraidan avulla, joiden väliin sauman kohdalle jää 20 mm leveä tartunnan estävä liimaton kaistale. Levytysalueen reunoilla teippi katkaistaan n. 5 cm ennen levyreunaa, jotta se jää kokonaisuudessaan rappauskerroksen sisään.

Rappausrakenne tehdään asennusohjeista poikkeavalla tavalla tasaisen rappauspinnan varmistamiseksi. Aluksi koko seinän alueelle levitetään lasikuituverkko ja ruiskutetaan elastinen jäykistysrappaus (Knauf/Marmorit SM 700). Sen jälkeen ruiskutetaan pigmentoitu pinta-rappaus, esim. Knauf/Marmorit SP 260 tai joku muu mineraalipohjainen pinta-rappaus, jonka raekoko on maksimissaan 3 mm.

Rapatuilla BluClad-levyillä toteutetun esimerkkirakenteen lisälämmöneristys ja tuuletusrako toteutetaan kuten Masterclad-levykorjauksessa luvussa 9.2.1. Korjausrakenteen kiinnitys vanhaan seinään tehdään myös kuten on esitetty Masterstone-levykorjauksen osalta.

9.3.2. LIITTYMÄDETALJIT

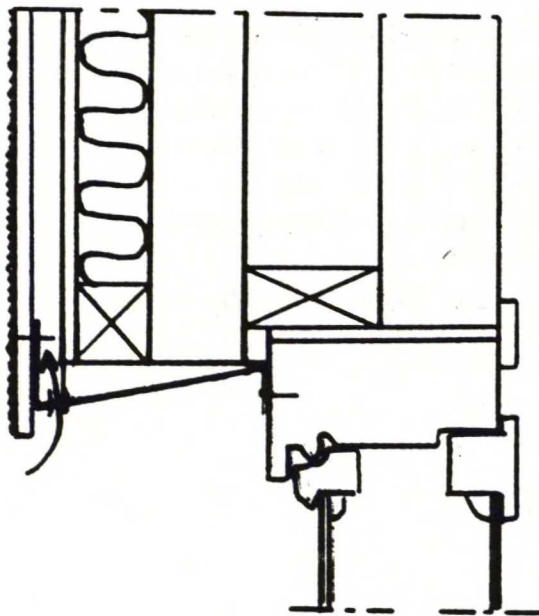
Rakennuksen ulkonurkan rakenne on esitetty kuvassa 9.13. Nurkkaan BluClad-levyjen päälle asennetaan ensin PVC-kulmalista, ja tämän päälle normaali rappausrakenne siten, että lasikuituverkko jatkuu yhtenäisenä kulman yli.



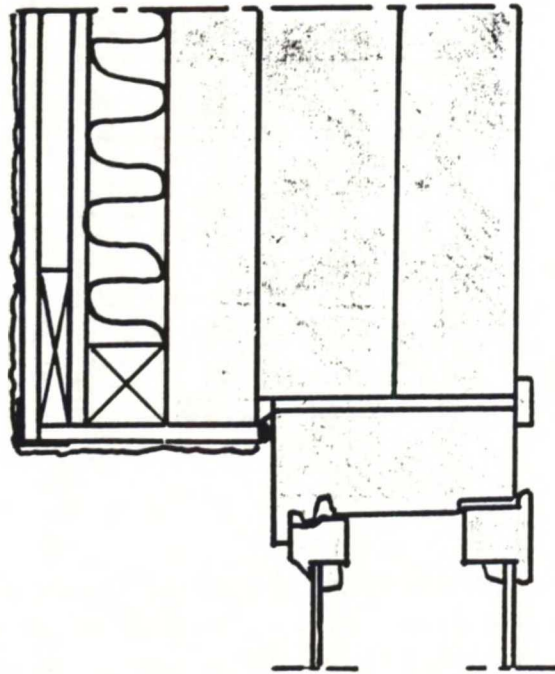
Kuva 9.13. Ulkonurkan rakenne.

Korjattavan seinäpinnan ja parvekeseinän välinen kulma tehdään kuten Masterstone-levykorjauksessa kuvan 9.6. mukaisesti. Ikkunan alapellin rakenne on myös samanlainen kuin Masterstonen tapauksessa kuvassa 9.9. Ikkunapelti nostetaan ikkunoiden sivuilla ylös pieli-levyn etupuolelle ja rappauspinta ulotetaan pellin reunan yli.

Ikkunan yläpielessä käytetään kuvan 9.14. mukaista taivutettua peltiä, jossa on kallistus ulospäin mahdollisen tuuletusraossa olevan veden poispääsyn mahdollistamiseksi. Pelti tuetaan vinoksi leikattujen pystykoolausten alapäiden varaan. Pellissä on tuuletusreiät $\phi 15$ k 35, jotta tuuletusrakoon aikaansaadaan riittävä tuuletus. Ikkunan sivupielenä käytetään rapattua BluClad-levyä ja julkisivupinnan välisessä kulmassa käytetään samanlaista rakennetta kuin ulkonurkissa. Pielilevyn ja ikkunankarmin välinen sauma tiivistetään silikonimassalla. Pielirakenne näkyy kuvassa 9.15.



Kuva 9.14. Ikkunan yläpielen rakenne.



Kuva 9.15. Ikkunan sivupielen rakenne.

Seinän yläosan liittyminen räystäääseen sekä seinän ja sokkelin liittymä tehdään kuvan 9.10. mukaisesti, kuten Masterclad-levyrakenteessa.

Vanhassa seinässä on pitkän seinän keskikohdassa yksi pystysuuntainen liikuntasauma. Pystysuuntaisen liikuntasauman rakenne on samanlainen kuin Masterstone-levykorjauksessa kuvassa 9.11. Lisäksi rakenteessa on oltava liikuntasaumojä pistys- ja vaakasuunnassa vähintään 6 metrin välein. Pystysuuntaiset liikuntasaumat sijaitsevat pitkillä seinillä 6 metrin välein ja päädyissä seinän keskellä. Päädyissä tehdään ulkonäkösyistä tarvittavan yhden vaakasuuntaisen liikuntasauman sijasta kaksi liikuntasaumaa, jotka sijaitsevat elementtien saumakohdissa kerrosten välissä. Pystysuuntaisen liikuntasauman rakenne on esitetty kuvassa 9.16. ja vaakasuuntaisen liikuntasauman rakenne kuvassa 9.17. Liikuntasaumassa levyn takana käytetään 2 mm paksua PVC-nauhaa. Levyjen väliin jätetään n. 12 mm leveä rako, joka saumataan elastisella saumaussmassalla. Tuulensuojalevyjen välisessä saumassa on kuituvahvisteinen Tyvec-teippi, joka asennetaan kuvan mukaisesti jättäen saumaan liikkumavaraa. Liikuntasaumojen kohdalla BluClad-levyn reuna on oltava sahaamaton, jolloin mikrosilikoniemulsiokäsittely estää kosteuden imeytymisen levyyn.

Luvussa 6.2.3. olleen rapatun BluClad-levyrakenteen tason suuntaisten kuormien kestävyyskokeen perusteella rakenne täyttää Englannissa levytysluokan 1 vaakakuormien kestävyysvaatimuksen 1,88 kN/m. Esimerkkikohteen tuulikuormat ovat tavanomaisia manneralueella esiintyviä kuormia, ja rakennuksen runko on jäykkärakenteinen tuulen aiheuttamaa kaatavaa voimaa vastaan kantavien laattojen, väliseinien ja päätyseinien ansiosta. Niinpä tuulesta ei aiheudu ulkoseinärakenteille merkittäviä tason suuntaisia siirtymiä ja esimerkkikohteessa ei ole tarvetta erikseen varmistaa rakenteen kestävyyttä tuulesta aiheutuneita siirtymiä vastaan.

Korjausrakenteen kiinnitys vanhaan seinään mitoitetaan samoilla kuormilla kuin Masterstone-levyrakenteen tapauksessa. Rapatun korjausrakenteen paino on maksimissaan yhtä suuri kuin Masterstone-rakenne.

Esimerkkikohteessa julkisivukorjaus ei koske alinta kerrosta eikä parvekeseiniä, joten korjausrakenteen iskunkestävyys ei ole kovinkaan merkittävä tekijä rakenteiden suunnittelussa. Jos rapattua levyrakennetta myöhemmin halutaan käyttää näissä paikoissa, iskunkestävyyttä voidaan parantaa käyttämällä pienempiä tukivälejä.

Luvussa 6.3. tehdyssä säärasituskokeessa ei rapatussa pinnassa havaittu lämpö- ja kosteusliikkeistä aiheutuvia halkeamia. Esimerkkikohteen rappauskerros poikkeaa tutkitusta rakenteesta siten, että lasikuituverkko asennetaan koko seinäpinnan yli, ja pintarappausmateriaali on erilainen (molemmat kuitenkin mineraalipohjaisia rappausaineita). Pinnan halkeilun kannalta pintarappauksella ei ole kovinkaan suurta merkitystä pohjarappauksen ominaisuuksiin verrattuna. Lasikuituverkon ulottaminen koko seinärakenteen yli ei ainakaan lisää halkeiluvaaraa, vaan päinvastoin on havaittu, että jos rappauskerrokseen syntyy halkeilua, nämä halkeamat esiintyvät tyypillisesti pinnassa olevissa epäjatkuvuuskohdissa. Tällainen epäjatkuvuuskohta syntyy lasikuituverkon reunaan asennettaessa verkko vain sauman alueelle.

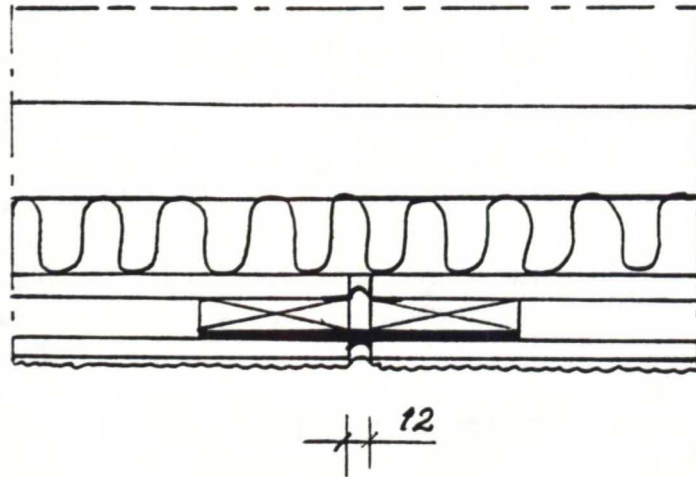
9.3.4. RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

Lisälämmöneristeen osalta korjausrakenne on samanlainen kuin Masterstone-levyllä toteutettu vaihtoehto. Tuuletusraon vaikutus seinän lämpötekniiseen toimintaan on myös likimain sama kuin Masterstonen tapauksessa, vaikka tuuletusrako nyt onkin kolmen kerroksen korkuinen. Luvun 9.2.4. perusteella korjatun seinärakenteen k-arvo on n. 0,28 W/m²K.

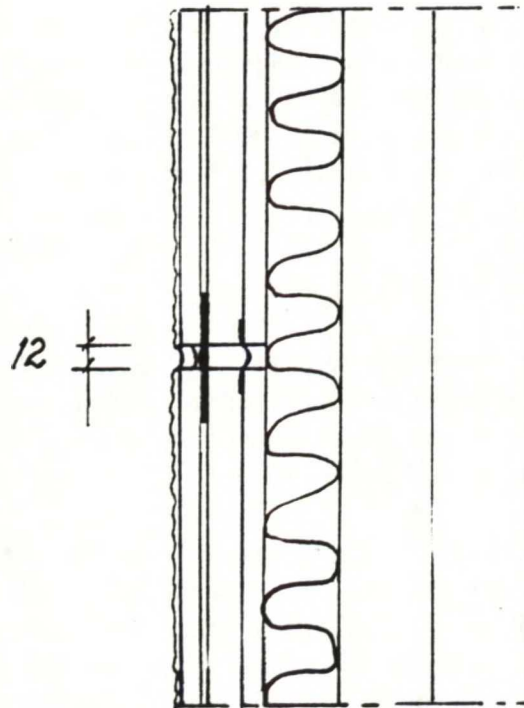
Luvussa 5.3.3. tutkittiin 8,4 m korkean tuuletusraon kosteudenpoistokykyä, ja se todettiin riittäväksi normaaliolosuhteissa sekä myös korjattavan seinärakenteen ollessa korjaushetkellä märkä. Jos tuuletusrakoon ei diffuusion lisäksi siirry sisäilmasta kosteutta muulla tavoin, pystyy kolmen kerroksen korkuinen (8,4 m) tuuletusrako maksimissaan poistamaan ulkoa päin tulevaa kosteutta vastaten n. 10×10^{-8} kg/m²s kosteusvirtaa. Luvun 7.2. sadetuskokeessa rapattu BluClad-levyrakenne osoittautui vesitiiviiksi. Kun liittymädetaljit toteutetaan huolellisesti, ei tuuletusrakoon tule kosteutta ulkoilmasta, ja tuuletusraon kosteudenpoistokyky on riittävä seinärakenteessa esiintyvän kosteuden poistamiseksi.

9.3.5. MUUT OMINAISUUDET

Luvussa 6.4.1. on tarkasteltu rapatun BluClad-rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä tehtyjen kokeellisten tutkimusten pohjalta, ja luvussa 8.2. on esitetty tämän työn yhteydessä tehty kokonaisen korjatun seinärakenteen säärasituskoe. Laboratoriokokeissa ei ole havaittu levyn



Kuva 9.16. Pystysuuntaisen liikuntasauman rakenne.



Kuva 9.17. Vaakasuuntaisen liikuntasauman rakenne.

9.3.3. MEKAANINEN TOIMIVUUS

BluClad-levyjen tukiväliä arvioitaessa seinälle kohdistuva mitoittava tuulikuorma on esimerkkikohteessa luvussa 5.2.2. olleen kaavan 5.1. mukaisesti $0,65 \text{ kN/m}^2$. Luvussa 6.2.2. olevan taulukon 6.3. mukaan 600 mm tukiväli on riittävä varmistamaan levyjen kestävyys tuulikuormaa vastaan ruuvien kiinnitysvälillä 300 - 600 mm.

tai rapatun rakenteen merkittävää ominaisuuksien huononemista. Luonnonolosuhteissa tehtävät pitkäaikaiskokeet ovat olleet käynnissä vasta vuoden ajan, joten laboratoriokokeiden vastaavuutta luonnonoloihin ja rakenteen kestävyyttä vuosissa on vaikea arvioida.

Korjausrakenteen ulkonäön pysyvyys riippuu ratkaisevasti levysaumarakenteen pitkäaikaiskäyttäytymisestä. Levysaumojen erottuminen tasaisesta rappauspinnasta on tämäntyyppisen rakenteen suurin ulkonäköön vaikuttava riskitekijä. Esimerkkikohteessa pohjarappauksen ja lasikuituverkon sijaitessa koko seinäpinnalla saumakohdan esilletulo ei ole yhtä suurena vaarana kuin asennusohjeen mukaista rakennetta käytettäessä. Ulkonäön pysyvyyden varmistamiseksi on odotettava luonnonoloissa tehtävän vanhennuskokeen tuloksia, vaikkakin laboratorio-kokeissa ei ole havaittu saumojen esilletuloa lämpötila- tai kosteusvaihtelujen alaisena eikä myöskään normaalien tasonsuuntaisten kuormitusten vaikutuksesta.

Karkea vaalea rappauspinta saattaa ajan myötä likaantua samalla tavoin kuin rappauspinta yleensä. Rappauspinta voidaan tarvittaessa puhdistaa harjaamalla tai painepesurin avulla. Rappauspinta voidaan myös maalata uudelleen epäorgaanisilla mineraalirappauspohjaan sopivilla pinnoitteilla. Seinäpintaan mahdollisesti syntyviä mekaanisia vaurioita voidaan korjata. Vaurion ollessa pienellä alueella kysymykseen tulee esim. vaurion tasoittaminen rappaukseen soveltuvalla korjauslaastilla tai levyn osittainen korvaaminen uudella levypalalla. Näiden toimenpiteiden jälkeen rappauspinta on uusittava vauriokohdasta. Kokonaisen levyn voi myös vaihtaa ja rapata vanhaa seinää vastaavaksi. Korjauskohtien erottuminen vanhasta rappauspinnasta on todennäköistä.

Suomessa ei ole tutkittu BluClad-levyn palo-ominaisuuksia, mutta Englannissa tehdyn lähes Suomalaista koetta vastaavan palamattomuuskokeen perusteella levy on luokiteltu palamattomaksi. Rappauspinta on palamaton, joten rapattu BluClad-levykorjaus täyttäneen luvussa 4.8. esitetyt julkisivurakenteen palonkestovaatimukset Suomessa.

9.3.6. KORJAUSKUSTANNUKSET

Luvun 4.7 yksikkökustannusvertailussa mukana olevan rapatun BluClad-levyrakenteen kustannukset on laskettu tässä esimerkissä ristikoolauksella ja 50 mm lisäeristyksellä toteutetun korjausrakenteen perusteella, jossa vahvistusrappaus ja verkotus on ulotettu yli koko rappauspinnan. Yksikkökustannusten erittely on esitetty liitteen 2 taulukossa 5. Yksikköhintalaskelmien avulla saatu rakentamiskustannus rapatulle BluClad-levykorjaukselle on 539 mk/m², josta hankintakustannukset olivat 140 mk/m² ja työ- ja materiaalikustannukset sosiaalikuluneen 275 mk/m². Työmaan yhteiskustannuksiksi ja urakoitsijan yleiskustannuksiksi on arvioitu 30 % välittömistä kustannuksista, eli 124 mk/m².

Kustannukset eivät sisällä mittauksia, eivätkä työmaakohtaisesti tehtäviä kiinnikkeiden vetokokeita ja valintaa. Rakennuttajakulut eivät myöskään sisälly laskelmiin. Saatu yksikköhinta vastaa siis kohteen urakoitsijakustannuksia.

Verrattaessa rapatuilla BluClad-levyillä tehdyn julkisivukorjauksen kustannuksia muiden kevytrakenteisten julkisivukorjausten kustannuksiin (taulukko 4.2.), nähdään, että korjauskustannukset ovat jonkin verran suuremmat kuin kaikkien menetelmien kustannusten avulla laskettu keskiarvo, joka on n. 490 mk/m². Muiden rappauspintaisten korjausmenetelmien kustannuksiin verrattuna rapattu BluClad-korjausmenetelmä on lämpörappausta kalliimpi vaihtoehto, kun taas rapatuilla metallikaseteilla toteutetun julkisivukorjauksen neliöhinta on n.

100 mk BluClad-korjauksen hintaa korkeampi. Rapattu BluClad-levykorjaus on hinnaltaan siis suhteellisen kilpailukykyinen esimerkkikohteen korjausvaihtoehto, kun korjauksella halutaan saavuttaa yhtenäinen saumaton pinta.

Rappauspinnan tekeminen kasvattaa työkustannuksia muihin levykorjausmenetelmiin verrattuna, mutta materiaalikustannukset ovat pienemmät kuin esim. Masterstonella tehtävässä korjauksessa johtuen levy- ja rappausmateriaalien edullisuudesta. Työn kalleus verrattuna materiaalien hintaan on yksi hyvä syy tehdä vahvistusrappaus ja verkotus koko seinän alalle, eikä vain saumojen alueelle. Näin vahvistusrappauksessa voidaan käyttää ruiskutusta hitaan lastalla levittämisen sijasta, ja rappausverkon asennus helpottuu.

Materiaalikustannusten suuruus riippuu valituista rappaus tuotteista. Käytettäessä rappauksessa esim. Sto:n orgaanisia rappaus tuotteita materiaalikustannukseksi saadaan 191 mk/m² ja kokonaiskustannuksiksi vastaavasti 605 mk/m², kuten liitteessä 20 on laskettu.

10. YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT

10.1. KEVYTRAKENTEISET JULKISIVUN KORJAUSMENETELMÄT JA BETONIELEMENTTIIJULKISIVUJEN KORJAUSTARVE

Diplomityön tavoitteena oli selvittää kevytrakenteisten julkisivukorjausmenetelmien, erityisesti saumallisen levykorjausmenetelmän ja saumattomaksi rapatun levykorjausmenetelmän kelpoisuutta vaurioituneiden julkisivupintojen korjaamiseen. Julkisivujen kevytrakenteisissa korjausmenetelmissä vanhan julkisivun päälle rakennetaan uusi julkisivurakenne ja julkisivupinta. Korjausrakenne ei yleensä tarvitse omaa perustusta, vaan se kiinnitetään vanhaan seinärakenteeseen.

Kevytrakenteiset korjausmenetelmät eroavat toisistaan materiaalien, julkisivupinnan ulkonäön ja rakenneratkaisujen toimintaperiaatteiden osalta. Rakenne on yleensä joko tiivispintainen tuuletusraallinen verhous tai sitten tuuletusraoton kerroksellinen rakenne, jossa materiaali-kerroksien vesihöyrynläpäisevyys teoriassa suurenee julkisivupintaa kohti. Pintavaihtoehtoina on rapattu saumaton pinta, levypinta joko pinnoitettuna, pinnoittamattomana tai kivirouheisena tai metalli-, tiili- tai betonikivipinta. Julkisivun korjausmenetelmien rakennuskustannukset vaihtelevat yleensä välillä 400 - 600 mk/m², kun korjaus sisältää lisälämmöneristeen asentamisen. Eri menetelmien välillä on kustannuseroja, mutta kustannukset vaihtelevat lähes yhtä paljon myös yhden ja saman menetelmän puitteissa kohteen ominaisuuksista ja olosuhdetekijöistä riippuen.

Julkisivun korjausmenetelmää valittaessa tulee ottaa huomioon menetelmän yleinen kelpoisuus sekä kelpoisuus kyseessä olevaan korjauskohteeseen. Yleisen kelpoisuuden selvittäminen sisältää pääasiassa rakenteiden ja materiaalien teknistä arviointia, joka soveltuu parhaiten kohteen rakennussuunnittelijan tai konsultin tehtäväksi.

Julkisivukorjauksen kohdekohtainen onnistuminen on suuressa määrin riippuvainen kohteen arkkitehtisuunnittelusta. Rakennuksen ulkonäkö muuttuu korjauksen yhteydessä aina jonkin verran, ja korjauksen tuloksena aikaansaattaa julkisivua katselee useampi asukassukupolvi. Haluttaessa suurempia muutoksia arkkitehtuurin merkitys korostuu entisestään. Esimerkiksi julkisivulevyjä käyttäen voidaan haluttaessa aikaansaada hyvin monenlaisia ulkonäkövaihtoehtoja ja kehittää uusia ratkaisuja. Huolellisella arkkitehtisuunnittelulla estetään keinotekoisien, ympäristöön sopimattomien julkisivujen syntyminen, ja aikaansaadaan ratkaisuja, jotka parantavat korjattavien rakennusten arvoa.

Toisena tärkeänä kohdekohtaisen soveltuvuuden kriteerinä tulisi olla haluttujen parannusten toteutuminen. Useissa tapauksissa kuitenkin taloudelliset seikat asetetaan etusijalle. Taloudellisessa vertailussa ei tulisi tuijottaa vain korjauksen rakennuskustannuksiin, vaan kustannusvertailuna tulisi olla jollakin investointilaskentamenetelmällä tehty kannattavuuslaskelma, jossa voidaan ottaa huomioon korjausinvestoinnin vaikutusaika, odotettavissa olevat huolto-kustannukset sekä lisäeristämisen vaikutus lämpökustannuksiin.

Korjattavista julkisivupinnoista suuren osan muodostavat betonielementtijulkisivut. Ensimmäiset betonielementtijulkisivut valmistuivat jo 1950-luvun alkupuoliskolla. Elementtituotannon nopea kasvu alkoi 1960-luvun alussa, ja betonielementtirakenteisten asuinkerrostalojen osuus kaikista rakennetuista asuinkerrostaloista kasvoi siten, että vuonna 1972 yli puolet kaikista

asuinkerrostaloista oli betonielementtirakenteisia. 70-luvun alkupuolelle sijoittui myös voimakkaan asuntotuotannon aika, jolloin rakennettiin suuria yhtenäisiä asuinalueita, lähiöitä.

Betonielementtijulkisivujen pitkäaikaiskestävyys on ollut huono. Tärkeimmät käyttöikää rajoittavat säilyvyystekijät ovat betonin karbonatisoituminen ja terästen korroosio sekä pakkasrapautuminen. Kestävyyteen vaikuttavat tekijät ovat tulleet esille vasta saatujen kokemusten ja tapahtuneiden vaurioiden kautta, ja vuosien kuluessa betonielementtien pitkäaikaiskestävyyden kehitystä on ohjattu viranomaismääräysten ja normien avulla. Lähivuosina korjattavaksi tulevien betonielementtijulkisivujen määrää on arvioitu erilaisissa pääasiassa viranomaisten rahoittamissa tutkimuksissa. Esimerkiksi KORVO-90 tutkimuksessa arvioidun korjausrakentamisen kehityksen perusteella, jos pintakorjausten osuus koko korjausrakentamisesta pysyy nykyisellä tasolla, pintakorjausten arvo nousisi vuoteen 2000 mennessä 600 - 700 milj. markkaan vuodessa. Asuntohallituksen vuonna 1989 tekemässä Helsingin kaupungin omistaman asuinrakennuskannan vauriokartoituksessa neljänneksessä tutkituista betonielementtijulkisivuista oli sellaisia vikoja tai vaurioita, jotka vaativat vuosikorjauksia vaativampia korjaustoimenpiteitä /19/. Suhteutettuna koko elementtirakenteiseen asuinrakennuskantaan vastaava korjaustarve julkisivuneliöinä ilmoitettuna olisi vajaa 2 milj. m² kyseisenä ajankohtana.

10.2. KEVYTRAKENTEISEN JULKISIVUKORJAUKSEN VAIKUTUKSET ULKOSEINÄN RAKENNUSFYSIKAALISEEN TOIMINTAAN

Vanhaa julkisivupintaa korjattaessa korjausrakenne vaikuttaa ratkaisevasti ulkoseinän rakennusfysikaaliseen toimintaan. Tässä työssä on rajoitettu tutkimaan tuuletusraollisten korjausrakenteiden rakennusfysikaalisia vaikutuksia, jotka ovat seurausta monien tekijöiden yhteisvaikutuksesta ja ovat siten vaikeasti hallittavissa.

Julkisivuverhouksen taakse jäävällä tuuletusraolla on tärkeä merkitys ulkoseinän lämpö- ja kosteustekniselle toiminnalle. Tuuletusraon tärkeimpänä tehtävänä on rakenteen sisällä olevan kosteuden poistaminen, joka on mahdollista vain riittävän suuren virtauksen omaavassa tuuletusraossa. Tuuletusraon virtaukset aiheutuvat ulkoilman ja tuuletusraon ilman lämpötilaeroista johtuvasta savupiippuvaikutuksesta tai tuuletusraon päiden välisestä tuulen paine-erosta, joista tuulen aiheuttamat virtaukset ovat yleensä huomattavasti suurempia. Varsinkin savupiippuvaikutuksen aiheuttaman virtauksen suuruuteen vaikuttaa voimakkaasti myös aurin gon säteily. Riittävän virtauksen mahdollistamiseksi tuuletusraon on oltava tarpeeksi paksu. Esimerkiksi lähteessä /41/ tehtyjen laskelmien mukaan 20 mm paksu tuuletusrako on riittävä tarpeellisen tuuletuksen aikaansaamiseksi yhden kerroksen korkuisella tuuletusraolla, jos tuuletusraon ulos- ja sisäänvirtausaukoissa sekä tuuletusraossa ei ole merkittäviä virtausta haittaavia supistumia.

Kosteutta tuuletusrakoon tulee rakennuksen sisältä diffuusiolla vanhan seinärakenteen läpi sekä mahdollisesti myös konvektiolla seinässä olevien reikien tai rakojen kautta. Diffuusiolla siirtyneiden kosteusmäärien poistamiseksi tuuletusraon kosteudenpoistokyky on yleensä riittävä. Konvektion aiheuttamat paikalliset kosteusmäärät voivat olla jopa satakertaisia diffuusiokosteuteen verrattuna, ja niiden huomioonottaminen tuuletusraon toimivuuden tarkastelussa on vaikeaa. Lisäksi kosteusrasituksia tuuletusrakoon voi aiheuttaa vanhan seinän kuivuminen ja sadevuodot julkisivuverhouksen raoista. Tästä syystä tuuletusraon kosteudenpoistokyky tulee mitoittaa suuremmaksi kuin mitä diffuusiolla tuuletusrakoon tuleva kosteus edellyttäisi.

Tuuletusraon merkitys ulkoseinän lämpötekniiseen toimintaan on sitä suurempi, mitä pienemmät ovat tuuletusraon virtaukset. Tällöin tuuletusraon ilma ehtii lämmetä tuuletusraon matkalla ja vaikutus seinärakenteen k-arvoon saattaa savupiippuvaikutuksella olla jopa $0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$ yhden kerroksen korkuisen tuuletusraon tapauksessa.

Tuuletusrakoa paljon suurempi vaikutus seinän lämmöneristävyyteen on kuitenkin korjauksen yhteydessä mahdollisesti asennettavalla lisälämmöneristeellä. Riittävällä lämmöneristyspaksuudella aikaansaadaan nykyistä k-arvovaatimusta vastaava seinän k-arvo $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tarvittavat eristyspaksuudet pehmeää mineraalivillaa käytettäessä ovat esim. kantamattomalla betonisandwich-elementillä 10 - 90 mm. Rakenteessa olevat kylmäsilat, kuten parvekelaatat, huonontavat koko seinärakenteen k-arvoa, mutta vastaavasti uuden julkisivurakenteen ansiosta seinän alkuperäiset mahdollisesti kastuneet lämmöneristeet kuivuvat ja niiden lämmöneristävyys palautuu. K-arvovaatimukseen pääsyyn vaadittavaa lisäeristyspaksuutta pienemmälläkin eristepaksuuksilla parannetaan usein seinärakenteen ominaisuuksia. Lisälämmöneriste vähentää ratkaisevasti vanhan seinän pakkasrasitusta, ja on siten usein välttämätön seinän lisävaurioitumisen estämiseksi. Lisäksi seinien sisäpintojen lämpötilat nousevat ja asumismukavuus paranee. Energiataloudellisessa mielessä lisälämmöneristäminen ei ole nykyisillä energian hinnoilla kannattavaa.

10.3. KALSIUMSILIKAATTILEVYILLÄ TOTEUTETTUJEN KORJAUSMENETELMIEN KELPOISUUS

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-julkisivulevyt ovat Englannissa valmistettuja kalsiumsilikaattilevyjä. Masterclad on pinnoittamaton peruslevy, Masterstone kivirouhepintainen ja Chromaclad sileä muoviakryylinpinnoitettu julkisivulevy. Näillä levyillä toteutettava julkisivun korjausrakenne on tuuletusraollinen avo- tai massasaumainen levyjulkisivu, jossa tukirakenne valmistetaan joko puusta tai metallista. Levymateriaalin mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia, samoin kuin levyn pitkäaikaiskestävyyttä on tutkittu Englannissa valmistajan Cape Ltd:n toimesta sekä riippumattomissa tutkimuslaitoksissa. Tutkimusten pohjalta on Mastercladille ja Chromacladille myönnetty Englannissa sertifikaatit niiden käytöstä julkisivulevyinä. Levyjen eliniän arvioidaan sertifikaateissa ylittävän julkisivulevyiltä vaadittavat 30 vuotta levyjen asennus- ja käsittelyohjeita noudattaen. Masterstonelle ei ole vastaavaa sertifikaattia, koska tuote pinnoitetaan kivirouheella Suomessa, eikä sitä ole Englannissa saatavana.

Luvussa 5. on käyty läpi pääasiassa Mastercladilla tehtyjä tutkimuksia, ja arvioitu niiden soveltuvuutta Suomen oloihin. Suomessa julkisivulevyihin kohdistuvat rasitukset ovat lämpötilavaihtelujen suhteen Englannin olosuhteita ankarampia, mutta tehdyt pakkaskokeet vastaavat Suomessa tehtäviä pakkaskokeita. Lisäksi on käynnissä pitkäaikaiskestävyysskoe luonnonolosuhteissa, jossa osa tutkimusympäristöistä vastaa Suomen ilmasto-oloja. Lämpötilavaihtelujen ei ole tutkimuksissa huomattu aiheuttavan levyjen lujuusominaisuuksien huononemista, mutta kosteusvaihtelut aiheuttavat levyihin vuosien kuluessa lievää haurastumista. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan levyt muistuttavat lähinnä kuitusementtilevyjä, paitsi että kalsiumsilikaattilevyjen kosteusmuodonmuutokset ovat pienempiä. Levyt ovat palamattomia, kuten Suomessa käytettäviltä julkisivumateriaaleilta edellytetään.

Saumallisen levykorjausrakenteen kelpoisuutta on luvussa 5.3 tarkasteltu sen rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta, jolloin päähuomio kiinnittyy rakenteessa olevan tuuletusraon kykyyn poistaa kosteutta ulkoseinärakenteesta. Tuuletusraon virtauksia ja rakennekerrosten

lämpötiloja todellisessa rakenteessa olevaa rakoa vastaavalle rakomallille on arvioitu tarkoitukseen kehitetyllä RAKO-ohjelmalla, ja näillä lähtötiedoilla sekä Suomen oloista esimerkiksi otetuilla Jyväskylän sääolosuhteilla on määritelty eri korkuisten tuuletusrakojen kosteudenpoistokyvyt. Tuuletusrakoon tulevia kosteusmääriä on arvioitu laskelmien ja eri lähteistä saatujen määrätietojen perusteella, ja kosteudenpoistokyvyn riittävyyttä on tarkasteltu erilaisten kosteusolosuhteiden vallitessa rakenteessa. Tuuletusraon kosteudenpoistokyky on laskelmien mukaan riittävä, kun rakoon tulee kosteutta rakennuksen sisältä diffuusiolla, tai jos esimerkiksi korjattavan betonisandwich-elementin ulkokuori on korjaushetkellä märkä. Korjattavassa seinässä olevat raot aiheuttavat tuuletusrakoon huomattavia paikallisia kosteuslisiä, joiden määrällinen arvioiminen on vaikeaa. Joissain tapauksissa konvektion avulla rakennuksen sisältä tuuletusrakoon tulevat kosteusmäärät ovat jopa satakertaisia diffuusiolla siirtyviin kosteusmääriin verrattuna, jolloin tuuletusraon kosteudenpoistokyky ei riitä rakenteen kuivattamiseen. Vanhassa seinässä olevat halkeamat tulisikin mahdollisuuksien mukaan tiivistää ennen julkisivukorjausta.

Englannissa Cape Ltd on kehittänyt julkisivukorjausmenetelmän, joka perustuu kahden ominaisuuden, saumattoman rapatun julkisivun ja tuuletetun levyrakenteen yhdistämiseen. Rapattavana pohjalevynä käytetään kalsiumsilikaattilevyä, joka on esikäsitelty molemmin puolin mikrosilikoniemulsiolla. Levyn tuotenimi on BluClad. Cape Ltd:n tuotevalikoimassa BluClad sijoittuu lujuusominaisuuksiltaan Mastercladin ja sisälevynä käytettävän Masterboardin väliin. Mastercladiin verrattuna BluCladin materiaali on kevyempää ja hauraampaa ja sen lujuusarvot ovat alhaisemmat. Kosteus- ja lämpöeläminen on samaa luokkaa kuin Mastercladin tapauksessa. BluCladin päälle tuleva rappauskerros kuitenkin muuttaa pinnoitetun rakenteen painoa ja lujuusarvoja todellisessa rakenteessa.

Rapatun BluClad-rakenteen kelpoisuuden arviointi perustuu vielä pelkästään laboratorio-tutkimuksiin ja erilaisiin laskelmiin, koska yhtään todellista referenssikohdetta ei ole olemassa. Rakenteen ongelmakohta on muiden samantyyppisten korjausmenetelmien perusteella rappauspinta levysaumojen kohdalla. Laboratoriokokeet sauman käyttäytymisestä mekaanisten rasitusten alaisina ovat antaneet lupaavia tuloksia saumarakenteen toimivuudesta. Pitkäaikaiskokeet luonnonolosuhteissa ovat vasta alkaneet kolmessa eri kohteessa erilaisissa ilmasto-olosuhteissa, joten tutkimustuloksia saumojen pitkäaikaiskestävyydestä ei ole tähän mennessä ollut olemassa.

Kokeellisessa osassa tutkittiin sadetuskokeen avulla avosaumaisen levyrakenteen ja saumattomaksi rapatun BluClad-levyrakenteen sateenpitävyyttä, sekä säärasituskokeella näillä korjausmenetelmillä korjattujen seinärakenteiden kestävyyttä ja toimintaa säävaihtelujen alaisena.

Saumallisen levyverhouksen sateenpitävyys riippuu ratkaisevasti käytetystä kiinnitysmenetelmästä. Sekä sadetuskokeen että säärasituskokeen tulosten perusteella voidaan sanoa, että naulakiinnitys ei ole sopiva julkisivulevyjen kiinnitysmenetelmä, käytettiinpä sitten esiporattuja tai esiporaamattomia levyjä. Todellisuudessa nykyään tehtävissä julkisivujen levykorjauksissa valtaosassa käytetään naulakiinnitystä tai tiivistämättömiä ruuveja. Vesikatoissa on jo kauan käytetty vesieristettyjä ruuveja, mutta tämä käytännön vaatimuksista lähtenyt kiinnitysratkaisu ei ole levinnyt julkisivujen levytyksiin. Sadetuskokeessa leveäkantaisten ruuvien sateenpitävyys oli hyvä käytettäessä ruuvin kannan alla EPDM-kumitiivistettä. Poranterään kiinnitetyllä jyrsimellä poistettiin kivirouhepinta eristeen alueelta, jolloin varmistettiin, ettei tiivisteen ja levyn väliin jäänyt rakoja.

Kokeiden mukainen avosaumarakenne ei aiheuttanut sadeveden tunkeutumista rakenteen läpi, mutta levyjen reunat imivät itseensä vettä pystysaumojen kohdalta sekä vaakasaumassa olleen vaakasaumalistan päältä. Avosaumarakennetta ei siis ole mahdollista saada täysin vesitiiviiksi, ja levyreunoista levyjen takapintaan imeytyvään vesimäärään tulee varautua tuuletusraon kosteudenpoistokykyä mitoitettaessa. Käytännössä, kun tuuletusrako tehdään 20 mm paksuna ja raon päät toteutetaan niin, että rako vastaa kuvassa 5.14. annettua rakomallia, on tuuletusraon kosteudenpoistokyky riittävä poistamaan diffuusiokosteuden lisäksi levyihin imeytyneen kosteus määrän. Varsinaisia vesivuotoja rakenteeseen ei voida sallia.

Saumattomaksi rapattu BluClad-levyrakenne osoittautui molemmissa kokeissa vedenpitäväksi. Minkäänlaisia vesivuotoja tai kosteuden imeytymistä levyihin ei esiintynyt yhtenäisen rappauspinnan ansiosta. Jos seinärakenteessa olevat liittymädetaljit on suunniteltu huolellisesti niin, ettei sitä kautta pääse vettä rakenteen sisälle, ei ulkoa tuleva kosteus vaaranna tuuletusraon kosteudenpoistokyvyn riittävyyttä.

Sadevettä voi rakenteeseen päästä huonosti suunniteltujen ja asennettujen pellitysten kautta, kuten kävi säärasituskokeessa molempien tutkittavien seinärakenteiden kohdalla. Tästä syystä liittymädetaljien suunnittelu on tehtävä erittäin huolellisesti ja varmistettava, että liittymät myös tehdään työmaalla suunnitelmien mukaisesti. Varmuuden vuoksi mahdollisen veden poistuminen levyseinän alareunassa on varmistettava käyttämällä rakenteita, jotka viettävät korjattavasta seinäpinnasta pois päin, ja joissa vesi voi poistua rakenteesta tuuletusreikien kautta. Lisäksi rakenteessa käytetty puutavara tulee olla painekyllästettyä.

Säärasituskokeessa lisälämmöneristyksellä aikaansaatiin hyvin lämpöä eristävä seinärakenne. Korjattavan seinän pakkasrasitus väheni lisäeristyksen myötä huomattavasti. Todellisessa rakennuksessa vanhan seinän lämpötilan voidaan arvioida laskevan 0 °C:n jäätymislämpötilaan vain alhaisilla n. alle -10 °C lämpötiloilla ja silloinkin vain silloin, kun pakkasjakso kestää yli vuorokauden, kun taas korjaamattoman seinän pinnan lämpötila vaihtelee suoraan ulkoilman lämpötila- ja säteilyolojen mukaan.

Säärasituskokeen muuttuvan säärasituksen aikana koeseinien betonilaatan ulkopintojen lämpötilat olivat lähes saman suuruisia riippumatta käytetystä lämmöneristeestä (50 mm paksulla pehmeällä lasivillalla ja tuulensuojalevyllä 8 °C ... 12 °C ja 30 mm paksulla muovikuitukankaalla päällystetyllä jäykällä lasivillalla 5 °C ... 12 °C). Tulosten perusteella korjausrakenteessa voidaan käyttää kumpaa tahansa lämmöneristysratkaisua.

Kokonaisuutena ajatellen Masterclad-, Chromaclad- ja Masterstone-levyillä toteutetun avosaumaisen levykorjausmenetelmän kelpoisuus Suomessa tehtäviin julkisivukorjauksiin on hyvä, kun muutetaan nykyisissä levykorjauksissa käytettävä eristämätön kiinnitysratkaisu eristettyyn ruuvikiinnitykseen, ja varmistetaan seinän muiden osien vedenpitävyys huolellisella detaljisuunnittelulla.

Rapatuilla BluClad-levyillä toteutetun korjausmenetelmän kelpoisuuden varmistamiseksi on välttämätöntä tutkia rakenteen toimivuutta luonnonoloissa. Pohjana tälle varovaisuudelle on muilla saumalliselle alustalle rapatuilla rakenteilla saadut huonot kokemukset. Laboratoriotutkimuksista saadut tulokset ovat kuitenkin hyvin lupaavia, ja menetelmän edut, joista suurimmat ovat saumaton julkisivupinta ja tuuletettu rakenne, luovat menetelmälle varmasti oman markkina-alueensa. Näistä syistä menetelmän jatkokehittelyyn kannattaa panostaa suuremman tutkimusprojektin puitteissa.

10.4. JATKOTUTKIMUSTARPEET

Masterclad-, Masterstone- ja Chromaclad-levyrakenteen jatkokehittäelyssä keskeisessä osassa on eristetyn ruuvi kiinnityksen ulkonäön suunnittelu sekä esiporaukseen käytettävän työmenetelmän ja työkalujen kehittäminen. Ruuvien kannan muotoilulla ja maalauksella voidaan suuresti vaikuttaa lopullisen seinärakenteen ulkonäköön, ja kiinnityksen valintakriteerejä voivat olla esim. mahdollisimman näkymätön ratkaisu tai tuotteelle valittu ominainen ulkonäkö. Esiporauksen työmenetelmän suunnittelussa vaihtoehtoina ovat mm. esiporaus valmiiksi tehtaalla ja esiporaus työmaalla. Valintakriteerinä tulee pitää taloudellisuutta sekä työn tarkkuutta ja helppoutta. Työssä käytettävän yhdistetyn poranterän ja jyrsimen tai poranterän ja ohjaimella varustetun erillisen jyrsimen suunnittelussa lähtökohtana voidaan pitää erilaisia kiven, lasin ja metallin työstössä käytettyjä vaihtoehtoja.

Rapatun BluClad-rakenteen tutkimisessa tulisi jatkossa keskittyä erityisesti rappauspinnan ominaisuuksien tutkimiseen ja varsinkin rappauskerroksen toimintaan levysaumoissa. Englantilaisen asennusohjeen mukainen rappausrakenne, jossa vahvistusrappaus ja rappausverkko asennetaan vain levysaumoihin, on ongelmallinen ohutta pintarappausta käytettäessä, sillä paksumpi saumakohta jää helposti näkyväksi. Lisäksi rappauskerroksessa olevat epäjatkuvuuskohdat, jotka syntyvät saumarakenteen reunoille, ovat rappauspinnoista aiemmin saatujen kokemusten perusteella potentiaalisia halkeilukohtia. Jos jäykistysrappaus ja rappausverkko levitettäisiin koko seinärakenteen alueelle, aikaansaataisiin tasapaksuinen rappauskerros, jossa pintarappausten rappauspohja olisi homogeeninen. Tällöin materiaalienekki olisi luonnollisesti suurempi, mutta työmenekki saattaisi jopa pienentyä, kun vahvistusrappaus voitaisiin levittää ruiskulla hitaan lastalevityksen sijasta. Eri rappausrakennevaihtoehtojen vaikutuksia ja paremmuutta tulisi verrata näiden esitettyjen kriteerien pohjalta.

Rappauskerrosten alla levysaumassa käytetään kuituvahvisteista Tyvec-teippiä, jossa teipin keskellä on rappauksen tartunnan estävä kaistale. Aiemmin tehdyissä tutkimuksissa sen paremmin kuin sääräsituskokeessakaan ei ole kuitenkaan voitu osoittaa saumateipillisen rakenteen paremmuutta ilman saumateippiä tehtyyn rakenteeseen nähden. Sen sijaan saumateippi itse saattaa erottua rapatusta pinnasta ohuilla rappauspaksuuksilla. Lisätutkimuksia saumateipin tarpeellisuudesta olisi siis tehtävä.

Saumarakenteen muodonmuutoskykyä saumateipillä ja ilman, eri rappausmateriaaleja käyttäen ja eri lämpötiloissa tulisi tutkia yksinkertaisella nykityskokeella. Koekappaleina voitaisiin käyttää pienehköjä yhden levysauman sisältäviä rapattuja levyrakenteita, joihin kohdistettaisiin väsyttävä nykitysliike nykityksen amplitudia vaihdellen. Verrattaessa saumarakenteen käyttäytymistä ja rakenteessa normaalisti esiintyviä lämpötila- ja kosteusliikkeitä saataisiin käsitys rappauksen toimivuudesta levysaumoissa, ja voitaisiin arvioida, mikä on maksimi levykoko sauman muodonmuutoskykyä ajatellen. Eri lämpötiloissa tehtävät kokeet antaisivat tietoa rappausmateriaalin elastisuuden pysyvyydestä alhaisissa lämpötiloissa.

Rapatun menetelmän kelpoisuus tulee mitä pikemmin varmistaa käyttämällä korjausrakennetta koekohteessa, jolloin voitaisiin tutkia rapatun levyrakenteen mekaanista ja rakennusfysikaalista toimintaa luonnonolosuhteissa sekä varsinkin rapatun pinnan ulkonäön pysyvyyttä pitkällä aikavälillä. Koekohteeksi valitaan todellinen julkisivukorjattava rakennus, jonka hinnoittelussa ja riskien jaossa otetaan huomioon kohteen koeluonne. Kohteessa voidaan mitata mm.

rakennekerrosten kosteuspitoisuuksia ja lämpötiloja, tuuletusraon virtauksia, levyrakenteen käyristymiä ja levysaumojen muodonmuutoksia. Seinärakenteessa rappauskerroksen osalta tulee tutkia erilaisia materiaali- ja toteutusvaihtoehtoja. Valituista kohdista voidaan ottaa näytepaloja esim rappauskerrosten tartunnan tutkimista varten. Ulkonäön pysyvyyttä voidaan tutkia silmämääräisellä tarkastelulla ja valokuvaamalla. Tämänäyttöinen luonnonolosuhteissa tehtävä tutkimus on vaativa projekti, ja sen suunnittelu ja toteutus on tehtävä huolellisesti. Mittausten järjestämisessä ja suunnittelussa kannattaa käyttää asiantuntija-apua, ja lisäksi ei saa unohtaa tilaajan asemaa rakennuksen omistajana.

Yksi suuri rapattuun levymenetelmään liittyvä jatkokehitysmahdollisuus on suomalaisten rappausmateriaalien kehittäminen levyjen rappamista varten. Levyrakenteen pintarappaukseksi soveltuvia rappausmateriaaleja Suomessa valmistetaan, mutta elastisia vahvistusrappauksia ei tee yksikään suomalainen pinnoitevalmistaja. Pinta- ja vahvistusrappausyhdistelmän ja levy-materiaalin yhteistoimintaa voidaan parhaiten tutkia pinnoitteen valmistajan toimesta, ja rappausmateriaalin toiminnan arvioimisen levysaumoissa voisi helposti yhdistää edellä selostettuihin muihin tutkimusprojekteihin.

LÄHDELUETTELO

- / 1 / Asuntoalueiden kaavoitus ja käyttökustannukset (ASTA II), Raportti 1: Laskentaperiaatteet sekä alustavia tuloksia. Sisäasiainministeriö, kaavoitus- ja rakennusosasto. Tutkimuksia 7/1982.
- / 2 / Bagge, John; Pukkila Olli. Ilmatekniikan suunnitteluopas. Osa 1.
- / 3 / BluClad-esite. Cape-boards, Cape Technical Services Department. 1993
- / 4 / Erkiö, E; Saarnio, P. Asuinrakennuskanta rakennuskannan investointiotoksen mukaan vuonna 1974. VTT, Rakennustalouden laboratorio. Tiedonanto 34.
- / 5 / Hellers, B G; Lundgren, S. Vindbelastning på huskroppar av allmän form - modellprov. Statens institut för byggnadsforskning. Report R22: 1974
- / 6 / Hynynen Ossi. Muurattujen seinien sateenpitävyyden perusteet. Diplomityö, TKK, Rakennusinsinööriosasto, Talonrakennustekniikka, 1983.
- / 7 / Iivonen, Pekka; Viljanen, Martti. Lämmön siirtyminen konvektiolla rakennuksen vaipan pinnoilla. TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Rakennustekniikan laitos, Julkaisu 68, Espoo 1984.
- / 8 / Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto. Julkisivun lisäeristäminen. SITRA, Julkisivujen pintakäsittely- ja lisäeristys projekti. Rakentajain kustannus Oy 1991.
- / 9 / Kronvall, Johnny. Air flows in building components. Lund institute of technology, Division of building technology, Report TVBH-1002. Lund 1980.
- / 10 / Lemminkäisen julkisivujen asennusohjeet, Masterclad, Cromaclad, Masterstone. Lemminkäinen Oy, Kattoyksikkö.
- / 11 / Liersch, K. Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Band 1 - Vorhangfassaden. 1981 Berlin.
- / 12 / Mäkelä Metals Oy:n tuotekansio 1993.
- / 13 / Nevander, Lars Erik; Elmarsson Bengt. Fukthandbok. Svensk Byggtjänst. Stockholm 1981.
- / 14 / Nieminen, Jyri. Rakennusta ympäröivä mikroilmasto, mittauksia koetalosta. VTT tiedotteita 880. Espoo 1988.
- / 15 / Ojanen, Tuomo; Kohonen, Reijo. Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. VTT tutkimuksia 590. Espoo 1989
- / 16 / Parma Oy. Näin käytät Steni-Parma julkisivulevyä.

- / 17 / Pentti, Matti; Silvennoinen, Petri; Kokko, Pekka. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjausmenetelmät. TTKK, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka, Raportti 40. Tampere 1990.
- / 18 / Petrow Seppo. Betonisten julkisivujen säilyvyys. Rakentajain kalenteri 1994, osa 1 Käsikirja, s. 295 - 302.
- / 19 / Pirttilä, Erkki; Vikström, Kari; Osara, Leo. Betonielementtijulkisivujen viat ja vauriot. Asuntohallitus, tutkimus- ja suunnitteluosasto, asuntotutkimuksia 4:1989. Helsinki 1989.
- / 20 / Päckilä; Aikivuori. Rakentajain kalenteri 1993.
- / 21 / Rakennuskanta ikääntyy, korjaustarve kasvaa. Rakennusala 1/92. Lohja Oy.
- / 22 / Ratu, 1143 M Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Teräsohutlevy-kasetti. 1991.
- / 23 / Ratu, 1144 R Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Teräsohutlevy-kasetti. 1991.
- / 24 / Ratu, 1147 M Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Rapattu mineraalivillaeriste. 1991.
- / 25 / Ratu, 1148 R Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Rapattu mineraalivillaeriste. 1991.
- / 26 / Ratu, 1149 M Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Pinnoitettu solu-muovieriste. 1991.
- / 27 / Ratu, 1150 R Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Pinnoitettu solu-muovieriste. 1991.
- / 28 / Ratu, 1151 M Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Levy- tai lauta-verhous. 1991.
- / 29 / Ratu, 1152 R Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Levy- tai lauta-verhous. 1991.
- / 30 / Ratu, 1153 M Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Pienelementit. 1991.
- / 31 / Ratu, 1154 R Korjaus-Ratu. Seinien lisälämmöneristäminen, Pienelementit. 1991.
- / 32 / RIL 107-1989. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto r.y.

- / 33 / RIL 144-1983. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto r.y.
- / 34 / RIL 155. Kosteuden- ja lämmöneristys. Suomen Rakennusinsinöörien liitto r.y.
- / 35 / RT-ohjetiedosto, RT 05-10390 Ilmasto, tuulet. 1989.
- / 36 / RT-ohjetiedosto, RT 82-10429 Metallikasetit julkisivuissa. 1990.
- / 37 / RT-tarviketiedosto, RT R-33007 Karaattilevy. 1989.
- / 38 / Saarimaa, Juho. Rakennuksen ulkovaipan osien kosteustekninen testaus. Licensiaattityö. TKK. Espoo 1981.
- / 39 / Sachs, Peter. Wind forces in engineering. International series of monographs in civil engineering. Vol 3. Germany 1972.
- / 40 / Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B1. Rakenteiden varmuus ja kuormitukset. Määräykset 1983. Sisäasiainministeriö.
- / 41 / Vepsäläinen, Päivi. Tuuletusraollisen teräsohutlevyverhouksen vaikutus ulko-seinärakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Diplomityö, TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Rakennetekniikan laitos, Talonrakennustekniikka, 1993.
- / 42 / Vesikari, Erkki. Betonin pakkasenkestävyys ja käyttöikä. VTT tutkimuksia 749. Espoo 1991.
- / 43 / Vesikari, Erkki. Betonirakenteiden käyttöikä. VTT tutkimuksia 417. Espoo 1986.
- / 44 / Viitanen, Hannu; Ritschkoff Anne-Christine. Puurakenteiden homehtumiseen vaikuttavat kriittiset kosteus- ja lämpötilaolosuhteet. VTT tutkimuksia 688. Espoo 1990.
- / 45 / Vikström, Kari. Betoniset julkisivuelementit asuinkerrostaloissa 1960-1970-luvuilla. Asuntohallitus ja Helsingin kaupungin asuntotuotantotoimisto. Helsinki 1989.
- / 46 / Viljanen, Martti. Lämmön siirtyminen säteilyllä rakennuksen vaipan pinnoilla. Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto, rakennetekniikan laitos. Julkaisu 67. Espoo 1984.
- / 47 / Viljanen, Martti; Iivonen, Pekka. Lämmön siirtyminen rakenteissa, Esimerkki-tapauksia II. TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Rakennetekniikan laitos. Julkaisu 71. Espoo 1985.

LÄMPÖTASEYHTÄLÖIDEN RATKAISUSSA KÄYTETYT VAKIOT JA KAAVOJEN MERKINNÄT

$$B_1 = c_p \rho v b$$

$$B_2 = \alpha_1(1-C_1) + \alpha_2(1-C_2)$$

$$B_3 = \alpha_1 C_3 + \alpha_2 C_4$$

$$C_1 = (\alpha_3 \alpha_{s2} + \alpha_2 D_4) / D_9$$

$$C_2 = (\alpha_3 D_3 + \alpha_2 \alpha_{s2}) / D_9$$

$$C_3 = (\alpha_{s2}(D_6 T_s + D_8) + D_4(D_5 T_u + D_7)) / D_9$$

$$C_4 = (D_3(D_6 T_s + D_8) + \alpha_{s2}(D_5 T_u + D_7)) / D_9$$

$$D_1 = \alpha_1 + \alpha_{s1} + k_1$$

$$D_2 = \alpha_4 + \alpha_{s4} + k_2$$

$$D_3 = \alpha_2 + \alpha_{s2} + k_1 - k_1^2 / D_1$$

$$D_4 = \alpha_3 + \alpha_{s2} + k_2 - k_2^2 / D_2$$

$$D_5 = (\alpha_1 + \alpha_{s1}) k_1 / D_1$$

$$D_6 = (\alpha_4 + \alpha_{s4}) k_2 / D_2$$

$$D_7 = k_1 q_1 / D_1$$

$$D_8 = k_2 q_2 / D_2$$

$$D_9 = D_3 D_4 - \alpha_{s2}^2$$

$$k_1 = 1/m_1$$

$$k_2 = 1/m_2$$

$$v = \text{ilman virtausnopeus raossa} \quad [\text{m/s}]$$

$$T = \text{pinnan tai ilman lämpötila} \quad [\text{K}]$$

$$b = \text{tuuletusraon leveys} \quad [\text{m}]$$

$$\alpha = \text{konvektion lämmönsiirtokerroin} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$\alpha_s = \text{säteilyn lämmönsiirtokerroin} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$m = \text{rakenneosan lämmönvastus} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

KEVYTRAKENTEISTEN JULKISIVUNKORJAUSMENETELMIEN YKSIKKÖ-KUSTANNUSLASKELMAT

Kustannukset eivät sisällä mittauksia, työmaakohtaisesti tehtäviä kiinnikkeiden vetokokeita tai valintaa.

Hankintakustannukset on ensin laskettu korjattavaa umpiseinäalaa kohti ja lopuksi koko seinäalaa kohti (sisältäen ikkunat).

RAM % tarkoittaa rakennusammattimiesten (kirvesmies, muurari, rappari) osuutta työryhmässä. Avustavat työt sisältävät materiaalien vastaanoton, sadevesien poiston järjestämisen sekä siivous- ja puhdistustyöt.

1. Julkisivulevykorjauksen yksikkökustannuslaskelma. Masterstone 6 mm.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|---|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|--------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | |
| Telinetyöt | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 33,50 | 100 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 k 600 | 2,0 | jm | 5,60 | yht 0,60 | 40,20 | 100 | |
| Verhouslevyt, kiinnikkeet ja listat | 1,05 | m ² | 182,00 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 20,10 | 100 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 10,00 | 100 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,07 | 4,70 | 100 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,06 | 4,00 | 100 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 256,20 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 70,40 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 167,80 | | 187,80 | | 355,60 |
| Yhteis- ja yleiskustannukset | 30 | % | | | | | 106,70 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 462,30 |

2. Julkisivulevykorjauksen yksikkökustannuslaskelma. Steni 6 mm.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 33,50 | 100 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 k 600 | 2,0 | jm | 5,60 | yht 0,60 | 40,20 | 100 | |
| Verhouslevyt, kiinnikkeet ja listat | 1,05 | m ² | 231,30 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 20,10 | 100 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 10,00 | 100 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,07 | 4,70 | 100 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,06 | 4,00 | 100 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 308,50 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 70,40 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 202,00 | | 187,80 | | 389,80 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 116,90 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 506,74 |

3. Metalliohutlevykorjauksen yksikkökustannuslaskelma. Muovipinnoitettu teräs-ohutlevy PVF - 20 mm. Paksuus 0,6 mm. Leveys 1080 mm, pituus vaihteleva.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus /m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|------------------------------|--------|-----|--------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | |
| Telinetyöt | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| (hissityölava 3000 kg) | | | | | | | |
| Vaakakoolaukset | 2.0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 33,50 | 100 | |
| 50x50 k 600 | | | | | | | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 | 2,0 | jm | 5,60 | yht 0,60 | 40,20 | 100 | |
| k 600 | | | | | | | |
| Verhouslevyt, kiinnikkeet ja listat | 1,05 | m ² | 68,90 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 20,10 | 100 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 10,00 | | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,07 | 4,70 | 100 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,06 | 4,00 | 100 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 146,10 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 70,40 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 95,70 | | 187,80 | | 283,50 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 85,10 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 368,60 |

4. Metallikaseteilla tehtävän korjauksen yksikkökustannuslaskelma. Liberta-järjestelmä. Materiaali muovipinnoitettu teräs PVF 2-pintainen. Paksuus 1,2 mm. Kasettien koko 600 X 1200.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|--------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | |
| Telinetyöt (hissityölävä 3000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,1 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset | 2,0 | jm | 6,10 | yht 1,2 | 72,80 | 65 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Teräskasetti, kiinnikkeet ja listat | 1,0 | m ² | 171,10 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 18,20 | 65 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 9,10 | 65 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,23 | 14,00 | 65 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,10 | 6,10 | 65 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 242,70 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 75,10 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 158,90 | | 200,20 | | 359,10 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 107,70 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 466,80 |

5. Saumattomaksi pinnaksi rapattavalla kalsiumsilikaattilevyllä tehtävän korjauksen yksikkökustannuslaskelma. Aluslevy BluClad. Pohjarappaus KNAUF/MARMORIT SM 700 S 5 mm ja pinnoite KNAUF/MARMORIT SP 260 3 mm.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 3000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 33,50 | 100 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 k 600 | 2,0 | jm | 5,60 | yht 0,45 | 30,20 | 100 | |
| Verhouslevyt ja kiinnikkeet | 1,05 | m ² | 77,80 | - | | | |
| Saumateippi | 1,2 | jm | 3,70 | yht 0,80 | 53,60 | 100 | |
| Rappausverkko | 1,30 | m ² | 8,70 | - | | | |
| Kontaktimassa | 0,125 | kg | 0,80 | - | | | |
| Pohjarappaus | 6 | kg | 28,00 | - | | | |
| Pintarappaus | 4,5 | kg | 15,00 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 15,10 | 0,30 | 20,10 | 100 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 10,00 | 100 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 3,30 | 0,23 | 15,40 | 100 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,06 | 4,00 | 100 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 213,60 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 103,00 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 139,90 | | 274,70 | | 414,60 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 124,40 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 539,00 |

6. Saumattomaksi pinnoitettavilla metallikaseteilla tehtävän korjauksen yksikkö-kustannuslaskelma. RR-julkisivu. Tässä menetelmässä on hankintakustannukset laskettu suoraan koko seinäpinta-alalle (ikkunat mukaanlukien).

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|------------------------------------|----------------|---------------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 3000 kg) | 1,0 | m ² | 14,50 | 0,10 | 4,90 | 0 | 19,40 |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 6,70 | yht 1,2 | 72,80 | 65 | 254,30 |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 4,80 | - | | | |
| Kiinnitysorret | 1,8 | jm | yht 170,00 | - | | | |
| Teräskasetti | 1,0 | m ² | - | - | | | |
| Tasoite | 2 - 5 | kg | yht 37,00 | yht 0,4 | 28,80 | 100 | 65,80 |
| Pinnoite | 2 - 5 | kg | - | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 9,60 | 0,30 | 20,10 | 100 | 29,70 |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 4,50 | 0,15 | 10,00 | 100 | 14,50 |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 2,20 | 0,23 | 15,40 | 100 | 17,60 |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 2,00 | 0,10 | 6,70 | 100 | 8,7 |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 95,20 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 251,30 | | 253,90 | | 505,20 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 151,60 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 656,80 |

7. Elementtimenetelmällä tehtävän korjauksen yksikkökustannuslaskelma. Coloroc.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 3000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 29,00 | 50 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Kannatinlistat k 300 | 3,8 | jm | yht | yht 0,60 | 34,80 | 50 | |
| Julkisivukivet | 17 | kpl | 175,80 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 17,40 | 50 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 8,70 | 50 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,10 | 5,80 | 50 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,07 | 4,10 | 50 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 247,40 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 62,80 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 162,00 | | 167,50 | | 329,50 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 98,90 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 428,40 |

8. Elementtimenetelmällä tehtävän korjauksen yksikkökustannuslaskelma. Rati, 1/2 k-limitetty elementti 600 x 1050 mm. Punainen savitiili.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|---|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 3000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 29,00 | 50 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 | 1,9 | jm | 5,60 | yht 1,10 | 63,80 | 50 | |
| Rati-elementit + kiinn. | 1,45 | kpl | 337,00 | - | | | |
| Saumalaasti | 6 | kg | 6,60 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 17,40 | 50 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 8,70 | 50 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 1,40 | 0,10 | 5,80 | 50 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,07 | 4,10 | 50 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 420,80 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 80,20 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 275,50 | | 213,90 | | 489,40 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 146,80 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 636,20 |

9. Mineraalivillarappauksen yksikkökustannuslaskelma. Rappaus-Karhu.
Tässä menetelmässä on hankintakustannukset laskettu suoraan koko seinäpinta-
alalle (ikkunat mukaanlukien).

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannukset / | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | m ² | määrä | yks mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 1000 kg) | 1,0 | m ² | 14,40 | 0,12 | 5,90 | 0 | 31,20 |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 18,00 | yht 0,60 | 38,40 | 65 | 101,20 |
| Rappausverkko | 1,30 | m ² | 10,00 | - | | | |
| Kiinnikkeet ja listat | 3 -5 | kpl | 22,00 | - | | | |
| Pohjarappaus | 20 | kg | yht 50,00 | yht 0,60 | 38,40 | 65 | 101,20 |
| Oikaisurappaus | 20 | kg | - | - | | 65 | |
| Pintarappaus | 7 | kg | - | - | | 65 | |
| Kalkkisementtimaali | 1,5 | kg | - | - | | | |
| Pellitykset | 0,65 | m ² | 9,60 | 0,30 | 19,20 | 65 | 38,40 |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 0,65 | m ² | 4,50 | 0,15 | 9,60 | 65 | 14,10 |
| Suojaus | 0,65 | m ² | 2,20 | 0,23 | 14,70 | 65 | 16,90 |
| Avustavat työt | 0,65 | m ² | 2,00 | 0,10 | 6,40 | 65 | 8,40 |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 79,60 | | 100,70 |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 132,70 | | 212,20 | | 344,90 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 103,50 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 448,40 |

10. Solumuovirappauksen yksikkökustannuslaskelma. Isora-julkisivujärjestelmä.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|--|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|-------------------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | mk/m ² |
| Telinetyöt (hissityölava 1000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,12 | 5,90 | 0 | |
| Sokkelilista | 1,05 | jm/jm | 1,90 | yht 0,15 | 9,10 | 50 | |
| Solumuovieristelevy ja liima | 1,05 | m ² | 41,90 | - | | | |
| Kiinnikkeet | 5 | kpl | 10,00 | - | | | |
| Lasikuituverkko ja kulmavahvisteet | 1,30 | m ² | 19,30 | yht 0,60 | 36,30 | 100 | |
| Tasoite | 4,5 | kg | 26,00 | - | | | |
| Pinnoite | 2,7 | kg | 23,00 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 14,60 | 0,30 | 18,20 | 50 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 9,10 | 50 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 3,30 | 0,23 | 14,70 | 65 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,10 | 6,40 | 65 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 171,90 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 59,80 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 112,60 | | 159,50 | | 272,10 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 81,60 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 353,70 |

LONG TERM EXPOSURE PROGRAMME-PRODUCT SUMMARY MASTERCLAD

| SITE | DATE | EXPOSURE TIME (YRS) | YOUNGS MODULUS | | PROOF STRESS | | MODULUS OF RUPTURE | | SPECIFIC WORK | | FAILURE STRAIN | | DENSITY Kt/m ³ |
|-------------------|--------|---------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|-----------|----------------|-----------|------------------------------|
| | | | strong | weak | strong | weak | strong | weak | strong | weak | strong | weak | |
| CONTROLS | | 0 | 12.10 ± 1.34 | 10 ± 1.29 | 19.20 ± 1.02 | 14.90 ± .56 | 27 ± 1.18 | 15.70 ± .70 | 5.20 ± .57 | .50 ± .10 | .36 ± .03 | .18 ± .02 | 1510 ± 30 |
| MOORHOUSE | Oct 86 | 1 | 15.25 ± .62 | 13.18 ± 1.30 | 24.10 ± .36 | 17.38 ± .48 | 30.75 ± .75 | 17.88 ± .48 | 4.25 ± .58 | .23 ± .05 | .30 ± .01 | .15 ± .02 | 1577 ± 11 |
| | Sep 87 | 2 | 14.99 ± .67 | 14.19 ± .78 | 24.63 ± .80 | 18.38 ± .55 | 29.96 ± .70 | 19.07 ± .60 | 2.96 ± .24 | .32 ± .06 | .26 ± .01 | .15 ± 0 | 1599 ± 16 |
| MERTLEWOOD | Oct 86 | 1 | 15.05 ± .69 | 13.13 ± .73 | 22.75 ± .26 | 17.35 ± .58 | 30 ± .96 | 17.78 ± .43 | 4.53 ± .15 | .25 ± .10 | .31 ± .01 | .15 ± .01 | 1605 ± 7 |
| | Sep 87 | 2 | 15.91 ± .39 | 13.54 ± 1.42 | 24.78 ± .42 | 18.31 ± .31 | 32.01 ± .48 | 18.75 ± .26 | 4.13 ± .17 | .30 ± .14 | .29 ± .01 | .15 ± .01 | 1643 ± 20 |
| PORTSMOUTH | Jun 86 | 1 | 15.75 ± 1.03 | 12.10 ± .72 | 24.68 ± 1.48 | 16.88 ± .83 | 31.73 ± 1.25 | 17.45 ± .64 | 4.13 ± .68 | .38 ± .05 | .29 ± .01 | .17 ± .01 | 1628 ± 4 |
| | Jul 87 | 2 | 15.03 ± .53 | 13.20 ± .77 | 23.25 ± 1.10 | 16.75 ± .60 | 30.65 ± .66 | 17.38 ± .50 | 4.23 ± 1.36 | .33 ± .10 | .30 ± .04 | .15 ± .01 | 1662 ± 17 |
| | Sep 90 | 5 | 14.78 ± 1.95 | 11.50 ± 1.64 | 19.73 ± .92 | 16.05 ± .69 | 28.18 ± 3.40 | 17.08 ± .62 | 3.88 ± 1.66 | .48 ± .09 | .27 ± .04 | .17 ± .02 | 1654 ± 34 |
| PRINCESS RISBORO* | Jul 86 | 1 | 15.53 ± .59 | 12.88 ± .36 | 23.60 ± 1 | 15.90 ± .70 | 29.05 ± .47 | 16.40 ± .45 | 3.58 ± .62 | .28 ± .10 | .27 ± .02 | .14 ± .01 | 1622 ± 15 |
| | Jul 87 | 2 | 14.53 ± .70 | 12.53 ± .67 | 23.33 ± .54 | 16.30 ± 1.05 | 29.98 ± .81 | 16.90 ± .97 | 3.78 ± .77 | .33 ± .05 | .29 ± .03 | .16 ± .01 | 1633 ± 34 |
| | Jun 90 | 5 | 15.14 ± .65 | 10.78 ± 1.54 | 22.85 ± .91 | 15.93 ± .61 | 29.58 ± .90 | 16.43 ± .75 | 3.40 ± .91 | .34 ± .16 | .26 ± .04 | .18 ± .02 | 1693 ± 16 |
| OSLO | Sep 86 | 1 | 14.98 ± .80 | 13.98 ± .33 | 22.68 ± .50 | 16.35 ± .96 | 28.08 ± .59 | 16.80 ± .78 | 3.15 ± .37 | .25 ± .06 | .27 ± .01 | .14 ± .01 | 1615 ± 10 |
| | Jul 89 | 2 | 14.63 ± .95 | 11.53 ± .85 | 24.50 ± 1.63 | 16.06 ± .50 | 30.41 ± 3.75 | 16.89 ± .24 | 3.48 ± 1.34 | .54 ± .13 | .28 ± .05 | .17 ± .01 | 1631 ± 21 |
| ST. GALLEN | Oct 87 | 1 | 13.59 ± .49 | 10.65 ± 2.50 | 23.59 ± 2.26 | 15.15 ± 3.36 | 22.61 ± .94 | 15.97 ± 3.05 | 2.81 ± .68 | .48 ± .19 | .25 ± .05 | .19 ± .04 | 1619 ± 10 |
| | Dec 88 | 2 | 13.79 ± .21 | 10.46 ± .68 | 22.14 ± 1.51 | 15.40 ± .56 | 26.14 ± 1.11 | 15.79 ± .28 | 2.69 ± .87 | .32 ± .02 | .27 ± .03 | .17 ± .01 | 1675 ± 47 |
| CLOUJURY | Dec 87 | 1 | 15.12 ± 1.10 | 11.21 ± .69 | 23.04 ± 1.69 | 15.49 ± .63 | 30.59 ± 1.59 | 16.41 ± .40 | 4.64 ± .42 | .59 ± .20 | .31 ± .02 | .17 ± .01 | 1608 ± 34 |
| | Oct 88 | 2 | 14.90 ± .85 | 10.87 ± 1.56 | 22.63 ± 2.48 | 15.70 ± .90 | 29.96 ± 1.48 | 16.32 ± .86 | 4.18 ± .81 | .46 ± .09 | .30 ± .03 | .18 ± .02 | 1610 ± 39 |
| IMMISAIL | Dec 87 | 1 | 16.55 ± .33 | 13.33 ± 1.36 | 26.06 ± .80 | 18.13 ± .14 | 33.42 ± .71 | 18.83 ± .34 | 4.03 ± .45 | .38 ± .12 | .28 ± .01 | .16 ± .01 | 1660 ± 34 |
| | Oct 88 | 2 | 13.34 ± 1.19 | 10.53 ± 1.53 | 23.48 ± .80 | 17.17 ± .88 | 30.25 ± 1.02 | 17.60 ± .90 | 4.48 ± 1.62 | .41 ± .17 | .33 ± .05 | .20 ± .01 | 1615 ± 18 |

Figure 4. CAPE RACKING TESTS ON RENDERED PANELS
 PANEL 1. SMALL SHEETS: ALL JOINTS REINFORCED
 RACKING STIFFNESS PERFORMANCE AT ZERO & 5kN/STUD

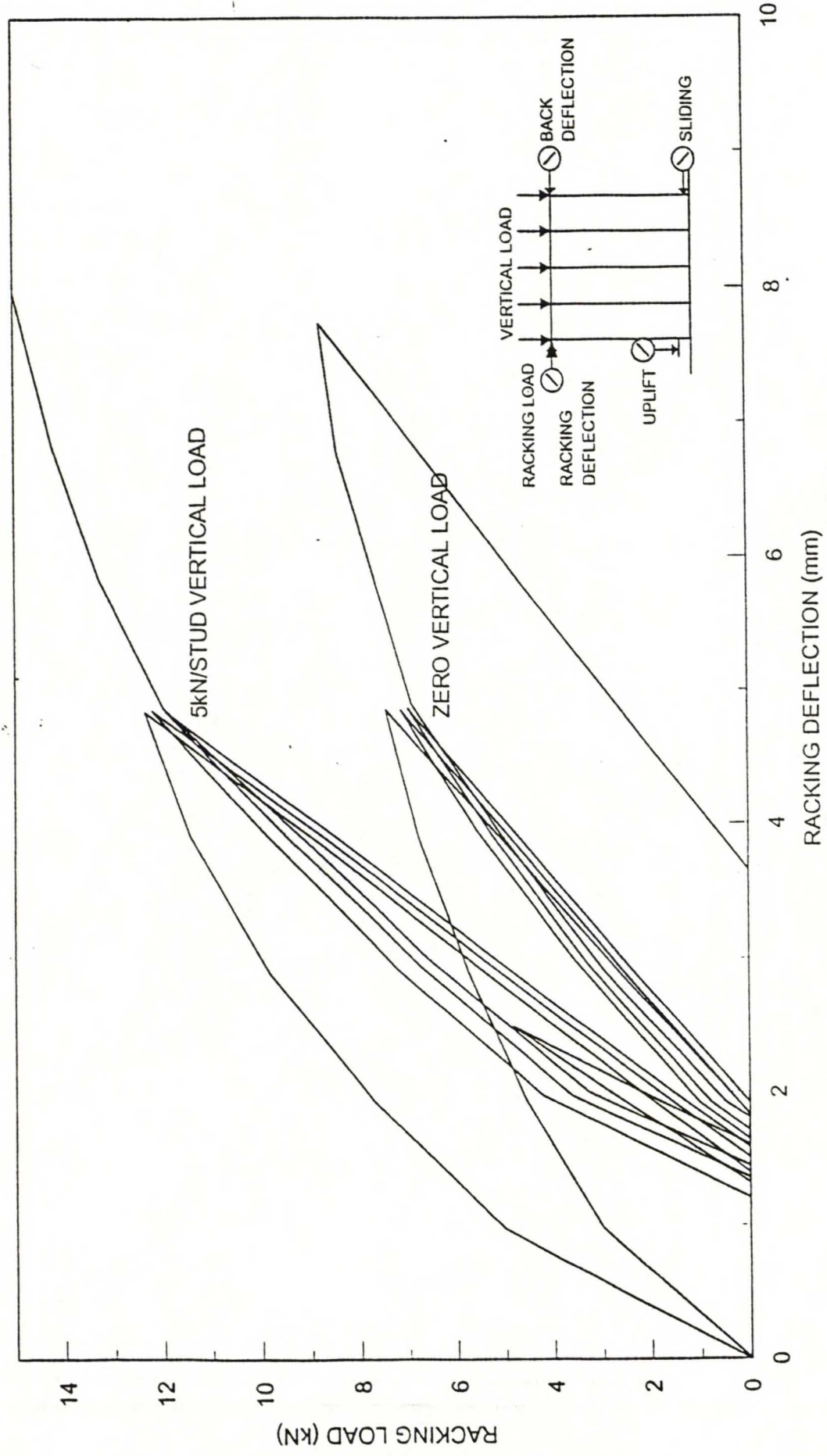


Figure 5. CAPE RACKING TESTS ON RENDERED PANELS
PANEL 2. STANDARD SHEETS: JOINTS REINFORCED
RACKING STIFFNESS PERFORMANCE AT ZERO & 5kN/STUD

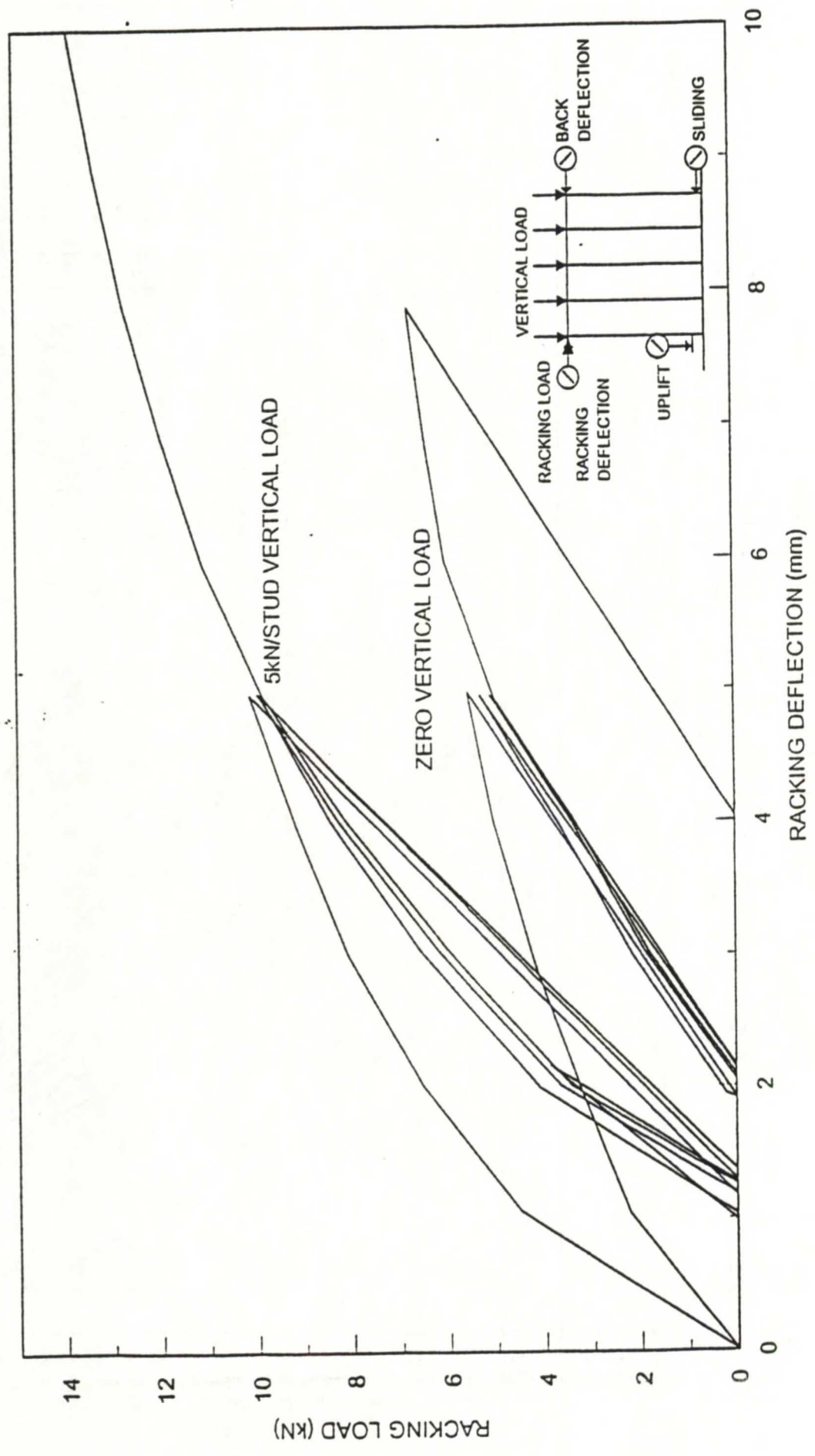
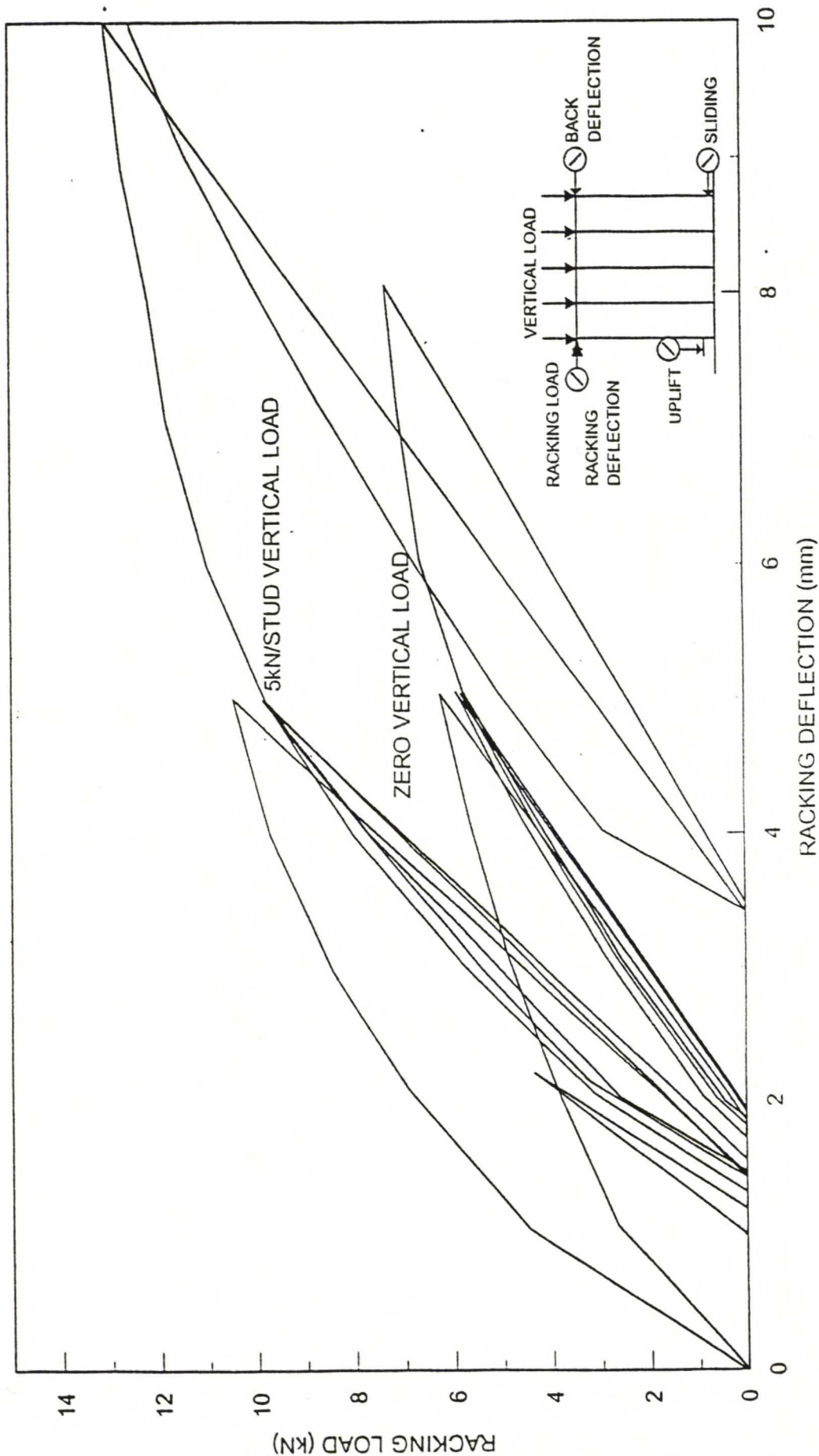
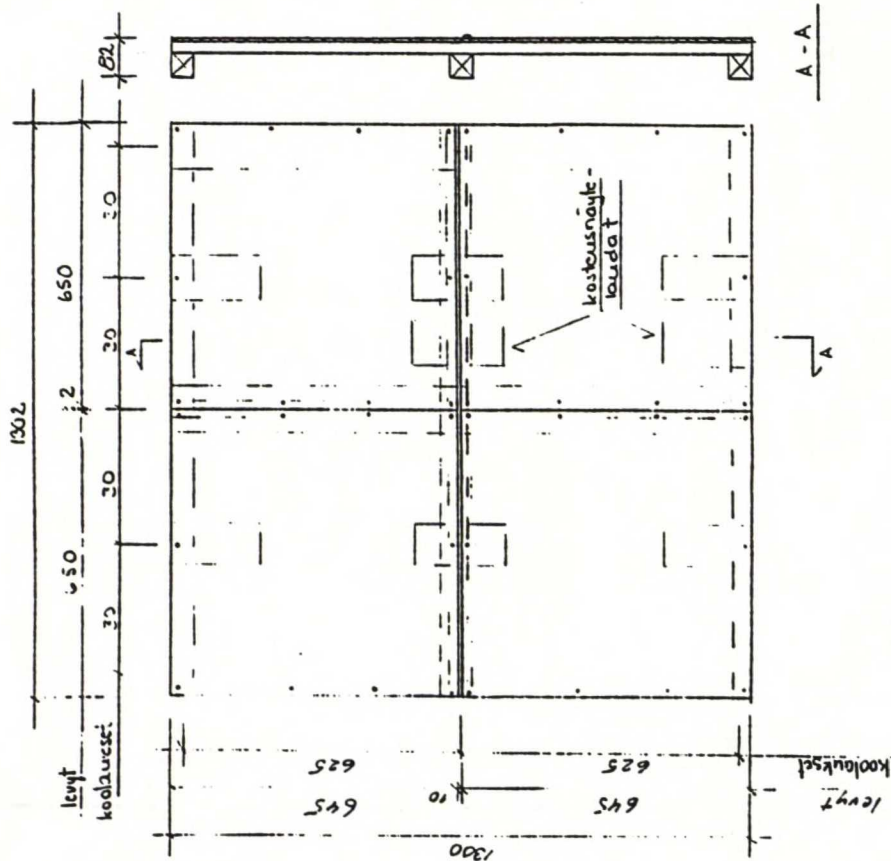


Figure 6. CAPE RACKING TESTS ON RENDERED PANELS
PANEL 3. STANDARD SHEETS: JOINTS PARTLY REINFORCED
RACKING STIFFNESS PERFORMANCE AT ZERO & 5kN/STUD





Kocsiina 1:10

vaakasuora koolaus 50.50

Pystysuora Koolau's 22 x 100

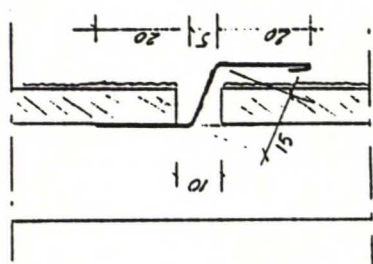
lukikapakeet 22 * 100. pituus 200

Haster stone-levyt (8mm + kivipinta n 2mm)

Үлгісі: $2,5 \times 30$ мм, есіпорыс $\phi 4,5$ мм

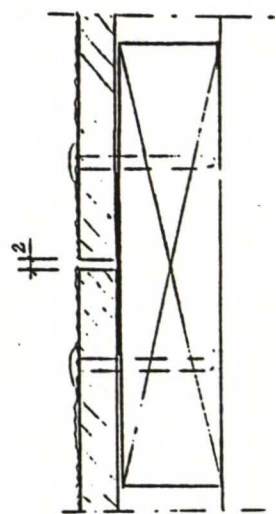
Senon aiaemassa vedenteräuspelti

Varaosaumassa ja aloreurossa kokkureunayteloudat 22,100. pituus 200



vaakasama 1:1

!rakasaumassa
yhtenäinen
vaakasaumalista
(pinnoitettu metalli)



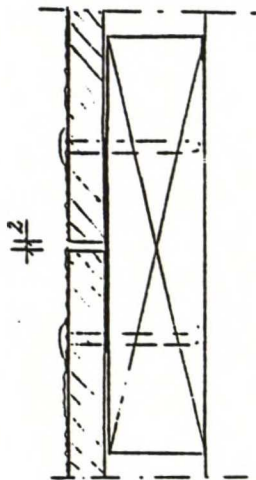
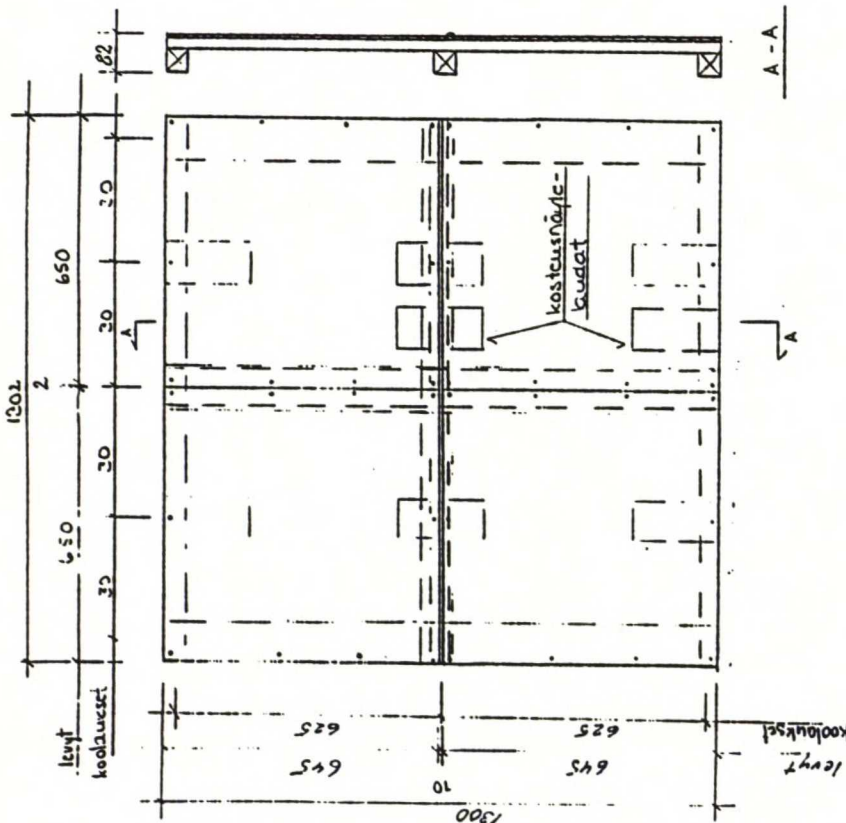
Pysty sauma 1:1

Pystysaumassa yhte-
väinen kumikaista
40 mm leveä.

Kumikaista 1:1 (EPDM)



Sodetuskoe
Koerakenne I
Saumallinen levyssinä, kumik.



pystysauma 1:1

Pystysaumassa
yhtenäinen
metallikointa
50 mm leveä

vaakasauma 1:1

Vaakasaumassa
yhtenäinen
vaakasaumalinta
(pinnoitettu metalli)

Koosteinä 1:10

Vaakasuora koostaus 50x50

Pystysuora koostaus 22x100

Tukikappaleet 22x100, pituus 200

Häpöteräiset karnalit (2,5x30), esiporaus ø4,5 mm

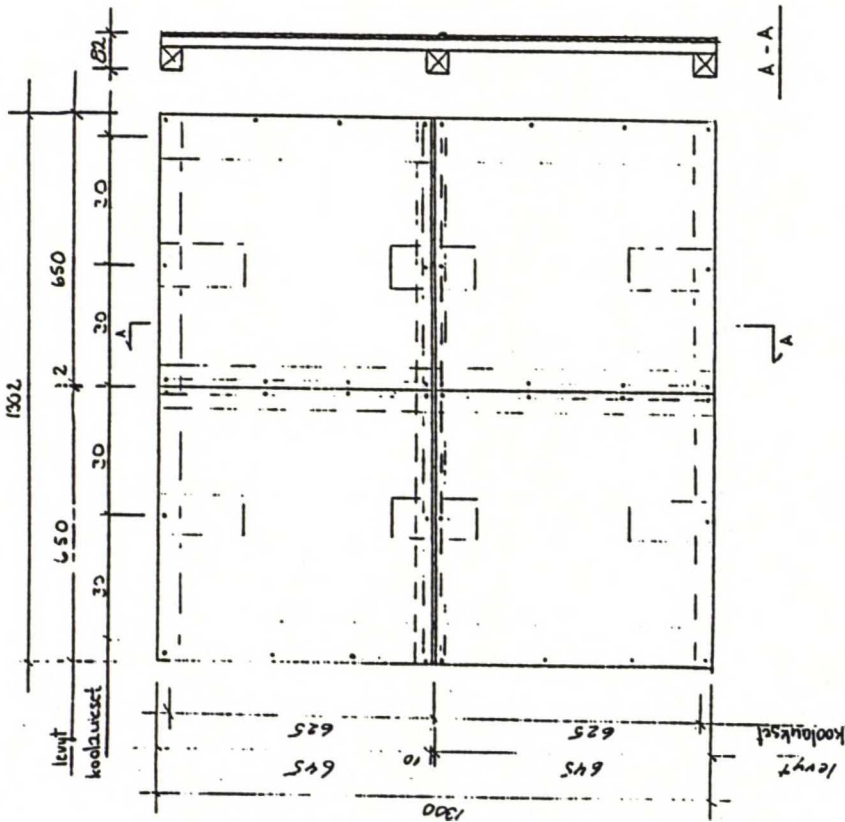
Seinän alareunassa vedenteräyspelti

Vaakasaumassa ja alareunassa kostusnäytecloudat 22x100, pituus 200

Sädetuskoe

Koerakenne II

Saumallinen levyseinä metallik



Kocscina 1:10

vaakasura koolaus 50.50

Pystysuora koolau 22 x 100

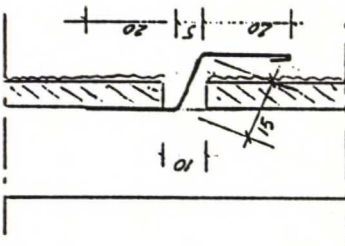
lukikapape? 22.100. pitux 200

Hoster stone- lcut (6 mm + kivipinta n 2 mm)

Тепонкестэвэт каннакст лэунаут (2.5.30), еи есипоауста

Senon alareunassa vedenteräyspelti

Vaivasaumassa ja alareunassa koostumusta ei ole tarkastettu. Vaivasaumassa ja alareunassa koostumusta ei ole tarkastettu.



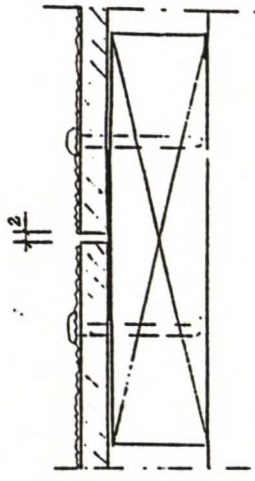
vaakasuma 1:1

vaakuisaumessa

ytteröinen

! vakasumalint

(pinnoitettu metalli)



pysty sauma 1:1

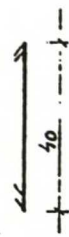
Pystysaunmaa inte-

nyāin kumikaista

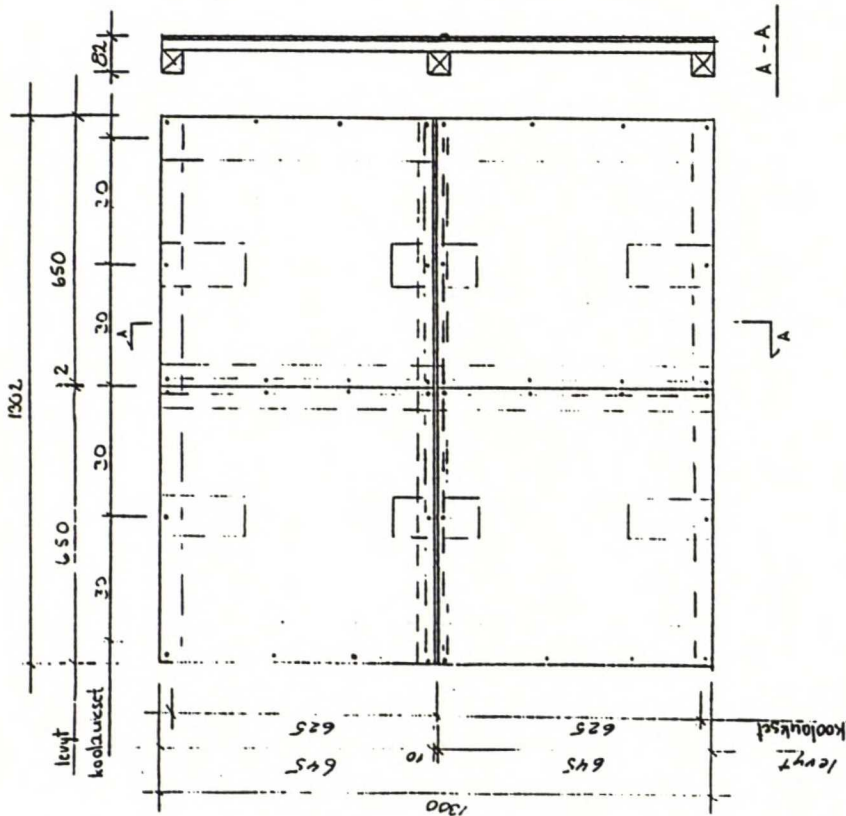
| | | |
|-------|------|--------|
| 40 mm | levé | kuinka |
| 40 mm | levé | kuinka |

40 mm level

Kumikaista 1:1 (EPDH)



Sadetuskoee
Koerakenne IV
Saumallinen levyseinä, kumik.



Kocscina 1:10

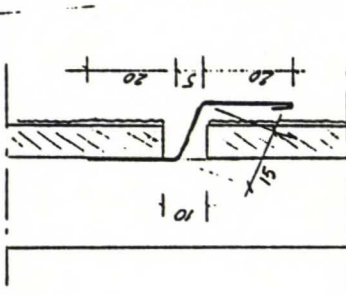
vaakasuora koolaus 50.50

pystysuora koolau's 22x100

22 = 100. pituus 200

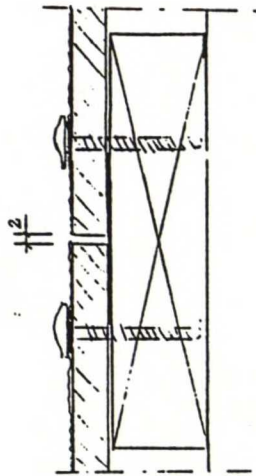
Hasterstone-leyt (8mm + kivipinta n 2mm)

Ruuvauksen tapolettienäillä 4.2-32 julkisivuunuvilla, kanta 13 mm
Ruuvien kannan alla kosteusriste ϕ 9 mm, pakkaus 2.4 mm (neopreeni)
Esporauus ϕ 5.5 mm, pinnan tasoitutus ϕ 9 mm



vaakasama 1:1

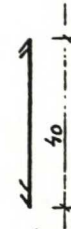
vaakasaumassa
yhtenäinen
vaakasaumalista
(pinnoitettu metalli)



pysty sama 1:1

Pystysaumassa yhte-
väinen kumikaista
40 mm leveä.

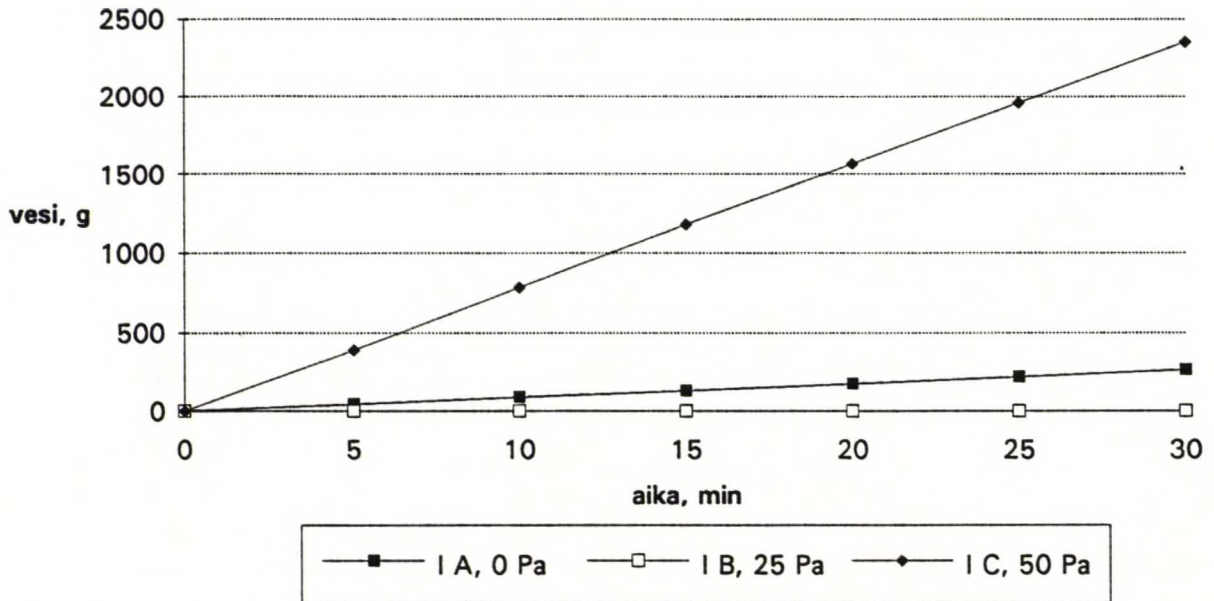
Kumikaista 1:1 (EPDH)



Sadetuskoee
Koerakenne V
Saumallinen levyssinä, kumik.

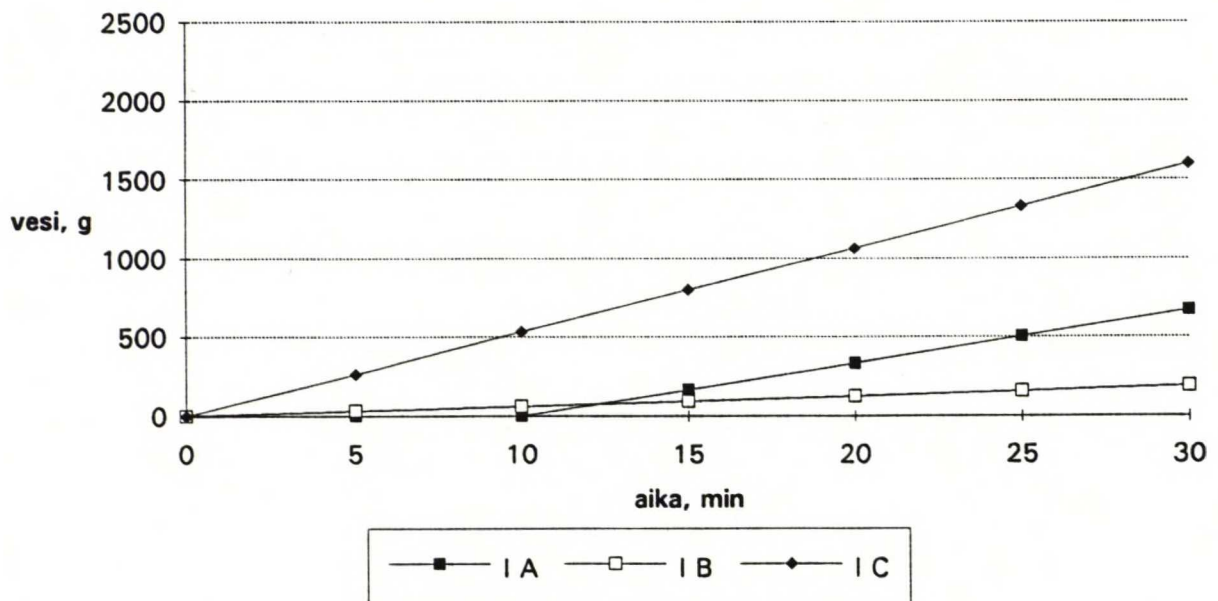
SADETUSKOKEESSA SAUMALLISTEN RAKENTEIDEN LÄPÄISEMÄT VESI-MÄÄRÄT

Läpi mennyt vesi, tasainen paine



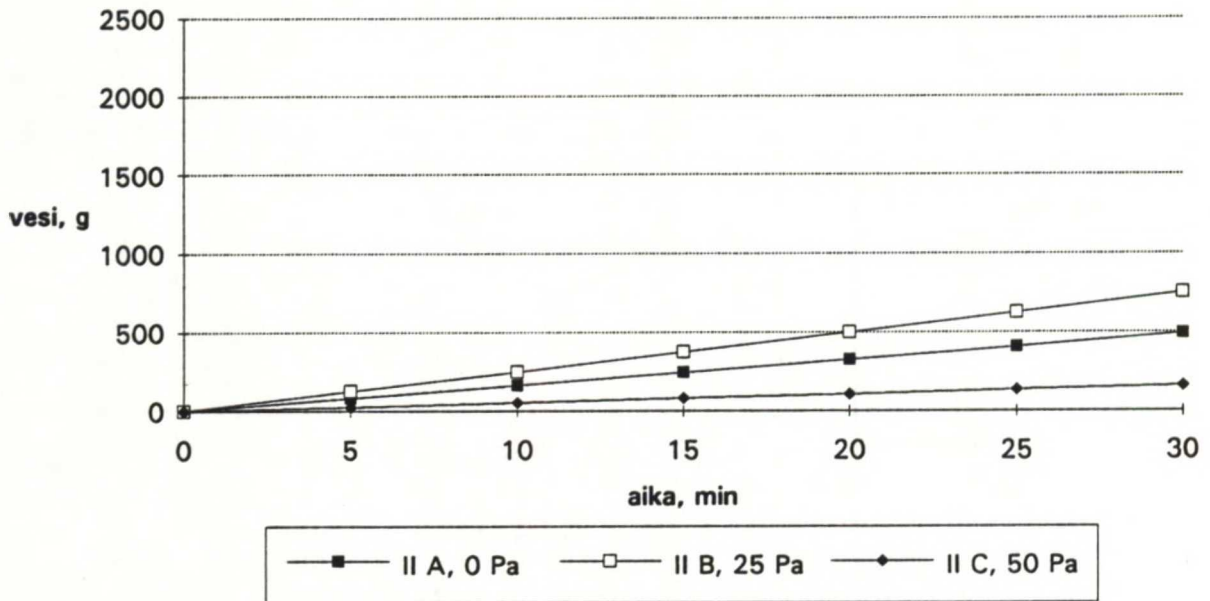
Kuva 1. Saumallisen levyrakenteen I läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen vakio-paineessa. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus esiporauksella.

Läpi mennyt vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa



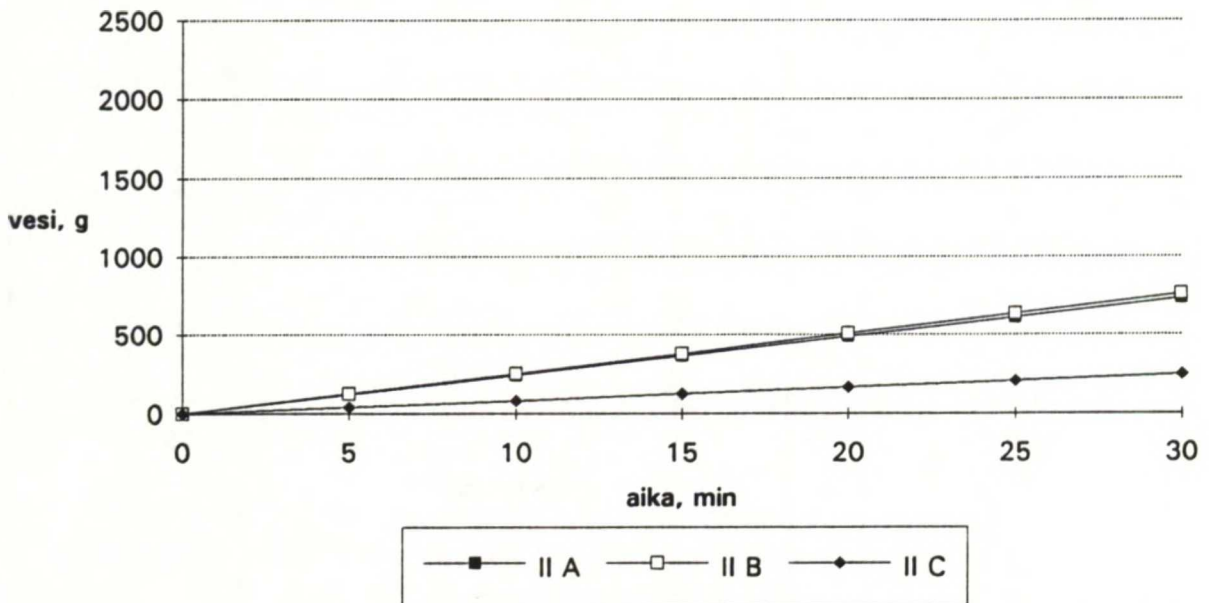
Kuva 2. Saumallisen levyrakenteen I läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen asteittain nousevan paineen aikana. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus esiporauksella.

Läpi mennyt vesi, tasainen paine



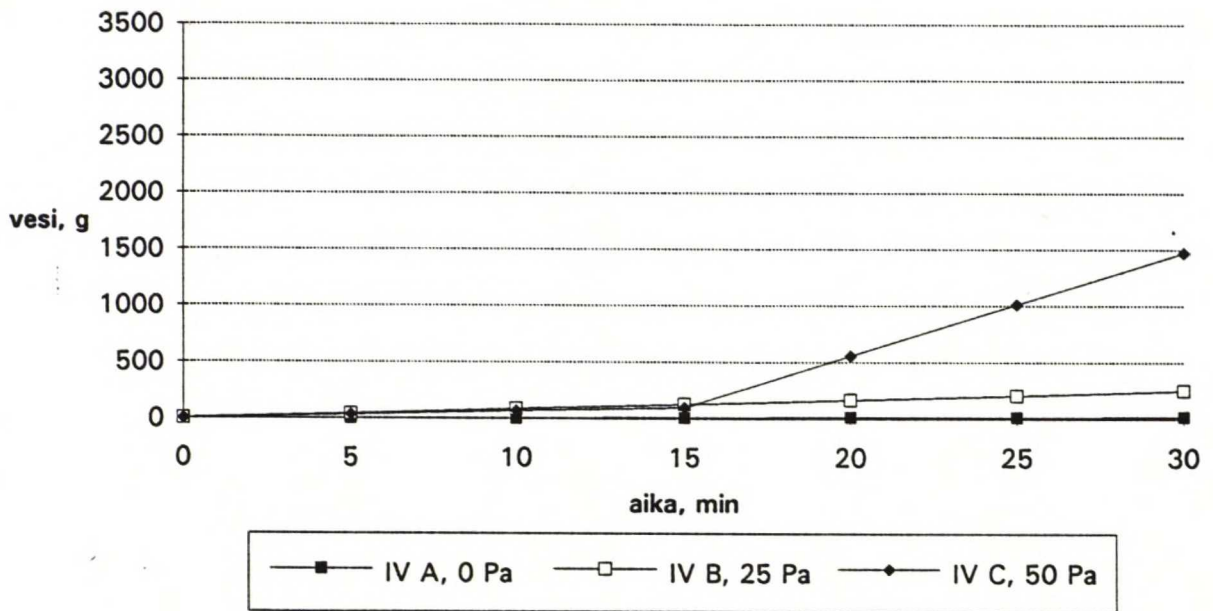
Kuva 3. Saumallisen levyrakenteen II läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen vakio-paineessa. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina muovipinnoitettu metallilista. Naulaus esiporauksella.

Läpi mennyt vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa



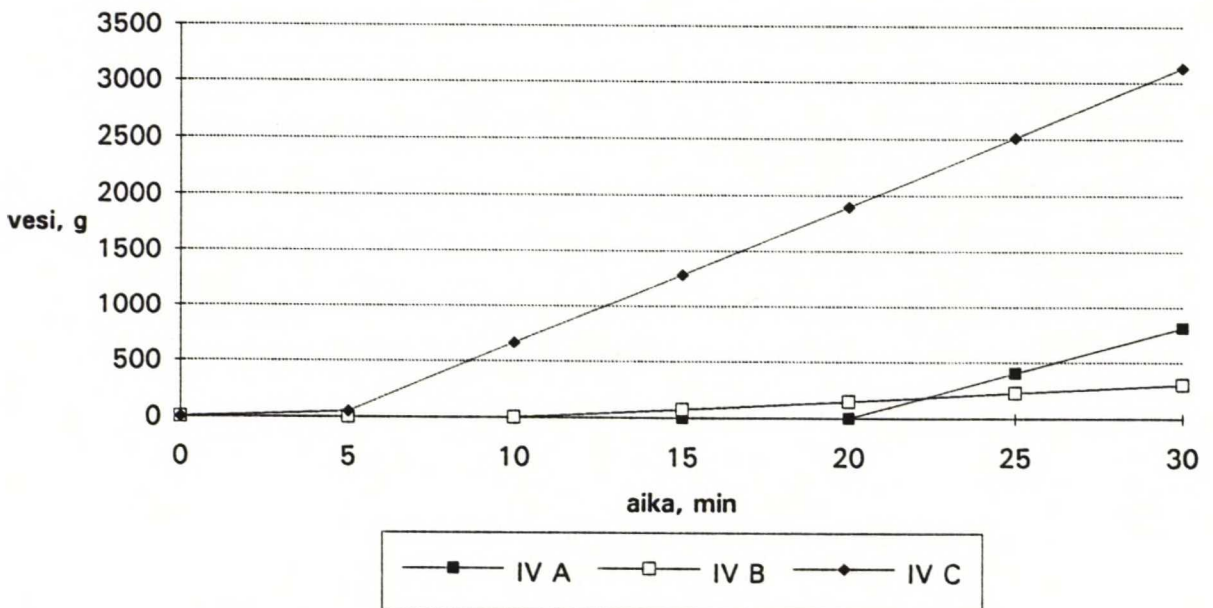
Kuva 4. Saumallisen levyrakenteen II läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen asteit-tain nousevan paineen aikana. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina muovipinnoitettu metallilista. Naulaus esiporauksella.

Läpi mennyt vesi, tasainen paine



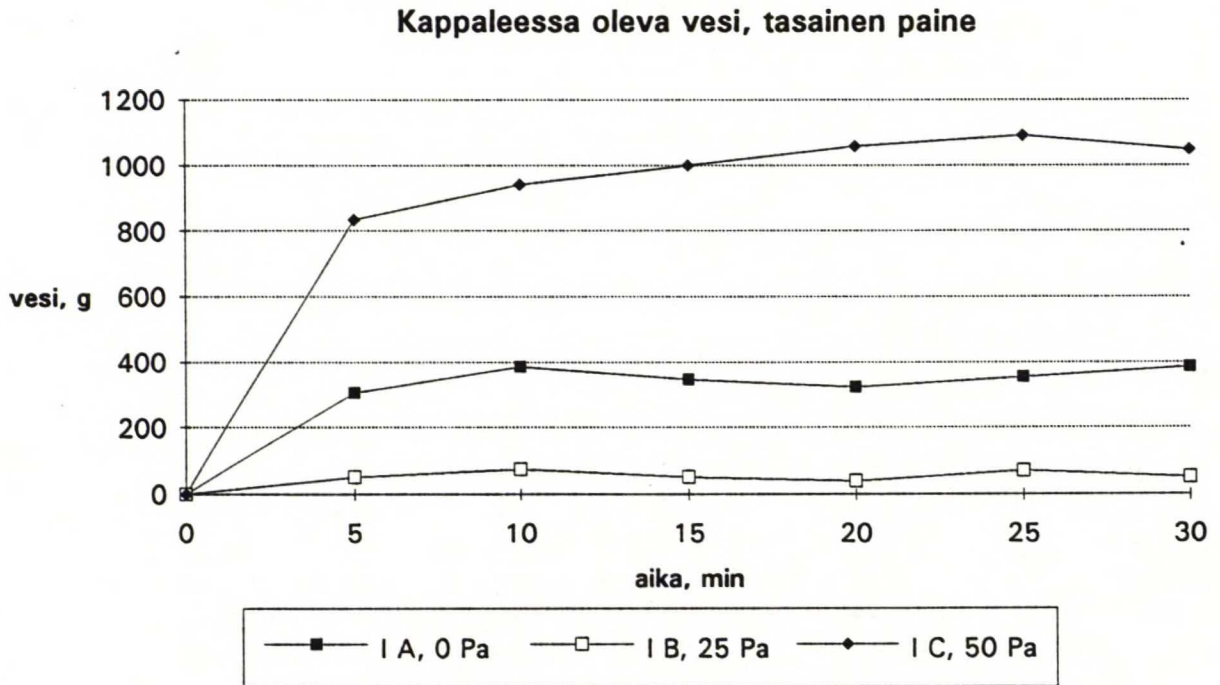
Kuva 5. Saumallisen levyrakenteen IV läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen vakio-paineessa. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ilman esiporausta.

Läpi mennyt vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa

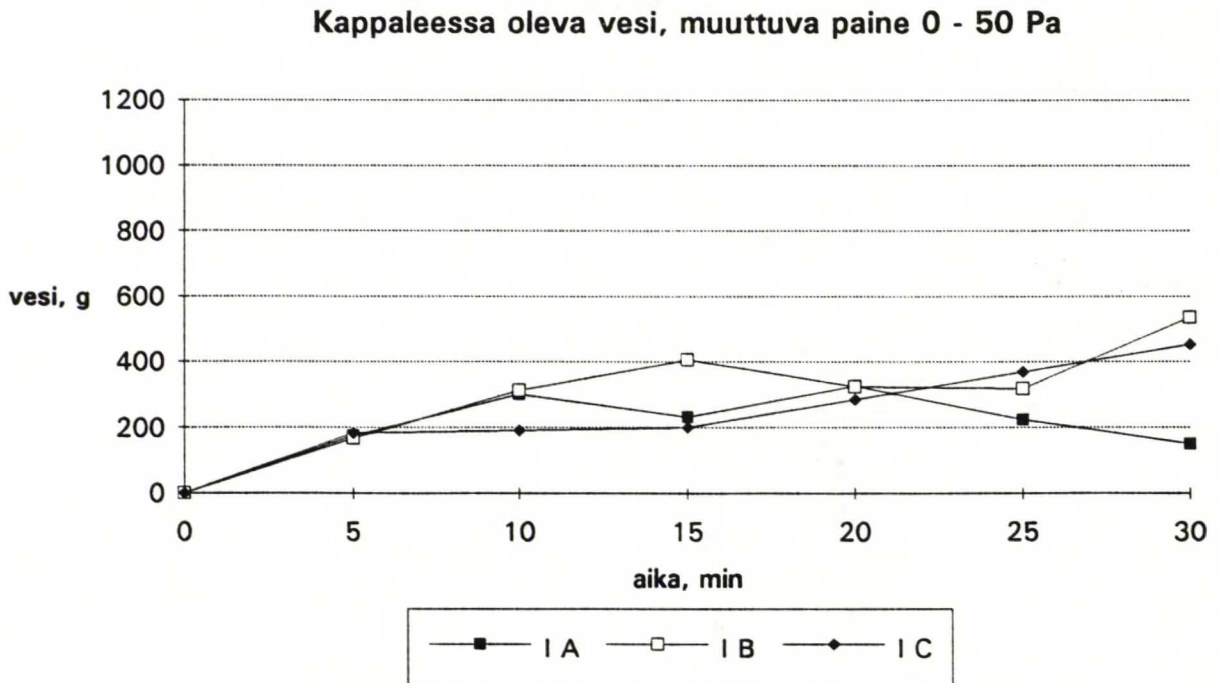


Kuva 6. Saumallisen levyrakenteen IV läpäisemä vesimäärä ja läpitulon alkaminen asteit-tain nousevan paineen aikana. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ilman esiporausta.

SADETUSKOEKESSE SAUMALLISIIN RAKENTEISIIN IMEYTYNYT VESIMÄÄRÄ

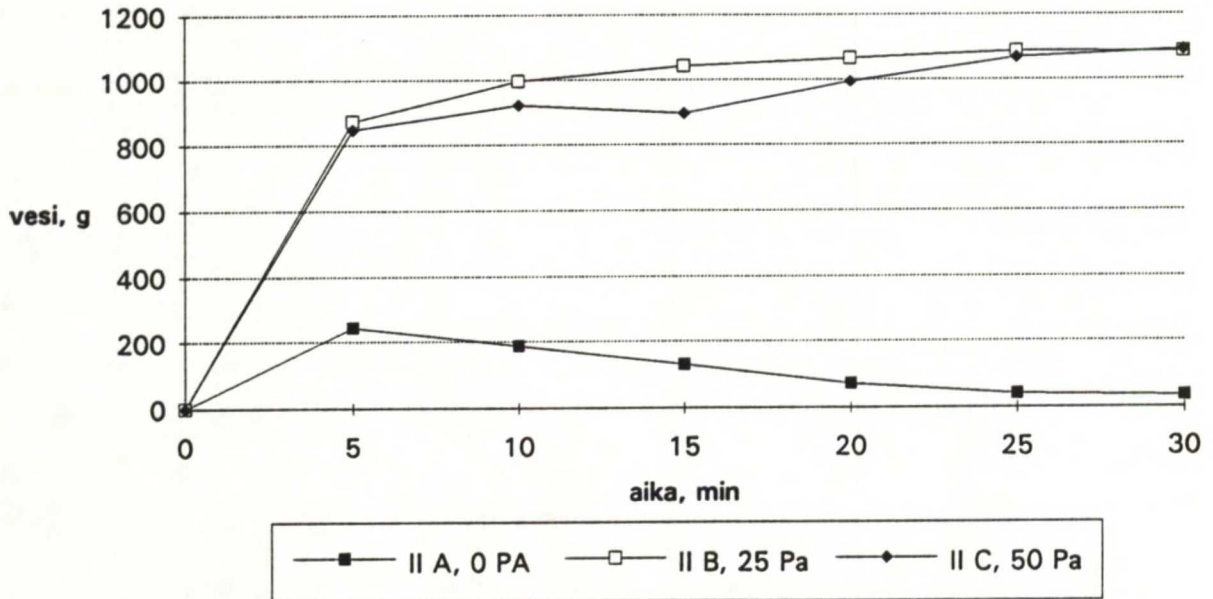


Kuva 1. Saumallisessa rakenteessa I oleva vesimäärä vakioaineessa. Avonaisen pysty-sauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ja esiporaus.



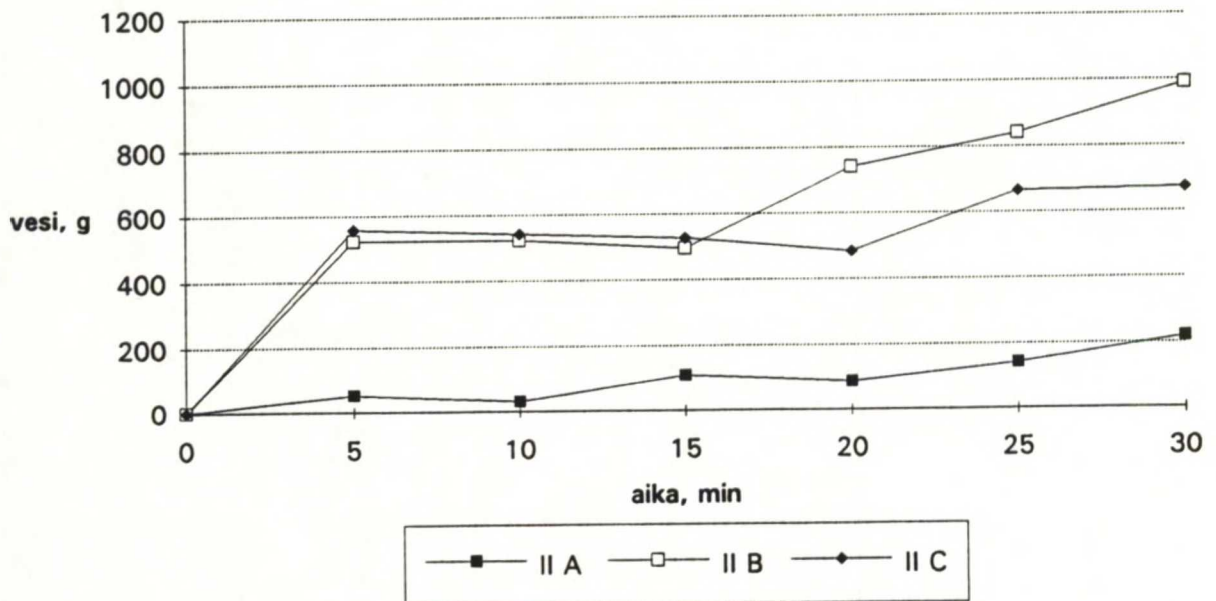
Kuva 2. Saumallisessa rakenteessa I oleva vesimäärä asteittain nousevan paineen aikana. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ja esiporaus.

Kappaleessa oleva vesi, tasainen paine



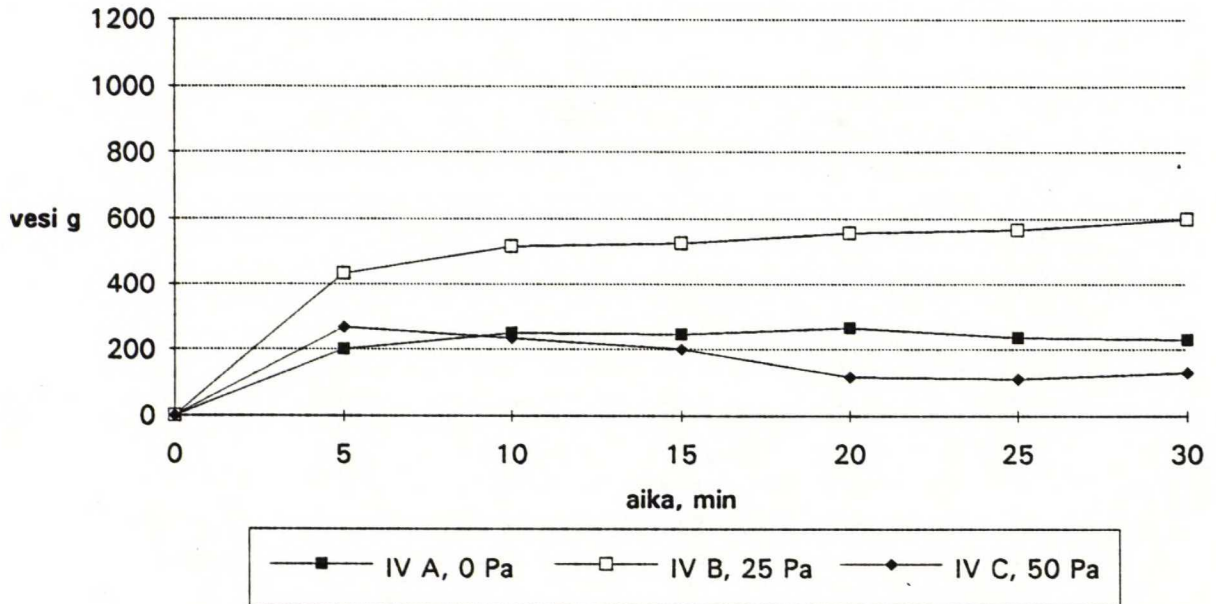
Kuva 3. Saumallisessa rakenteessa II oleva vesimäärä vakioaineessa. Avonaisen pysty-sauman taustamateriaalina muovipinnoitettu metallilista. Naulaus ja esiporaus.

Kappaleessa oleva vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa



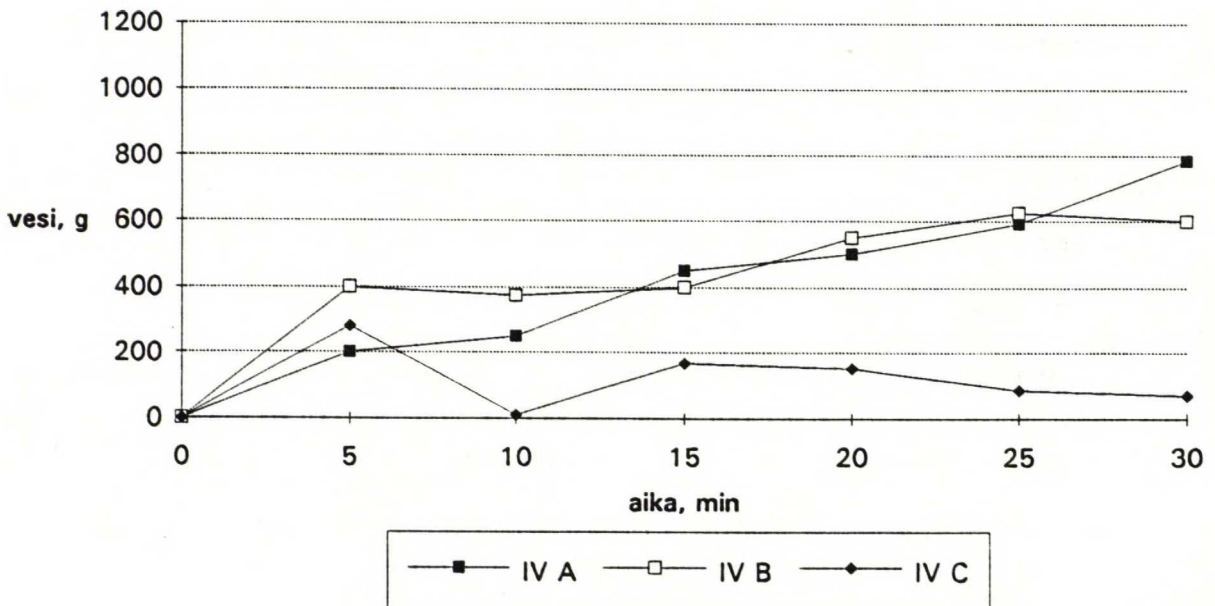
Kuva 4. Saumallisessa rakenteessa II oleva vesimäärä asteittain nousevan paineen aikana. Avonaisen pysty-sauman taustamateriaalina muovipinnoitettu metallilista. Naulaus ja esiporaus.

Kappaleessa oleva vesi, tasainen paine



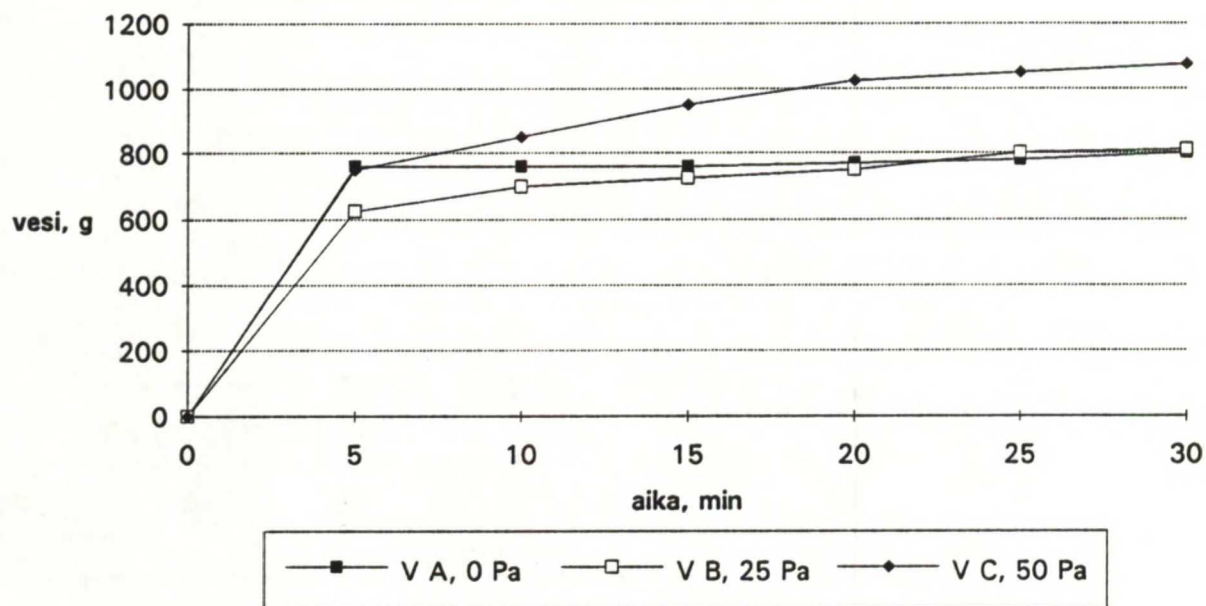
Kuva 5. Saumallisessa rakenteessa IV oleva vesimäärä vakioaineessa. Avonaisen pysty-sauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ilman esiporausta.

Kappaleessa oleva vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa



Kuva 6. Saumallisessa rakenteessa IV oleva vesimäärä asteittain nousevan paineen aikana. Avonaisen pystysauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Naulaus ilman esiporausta.

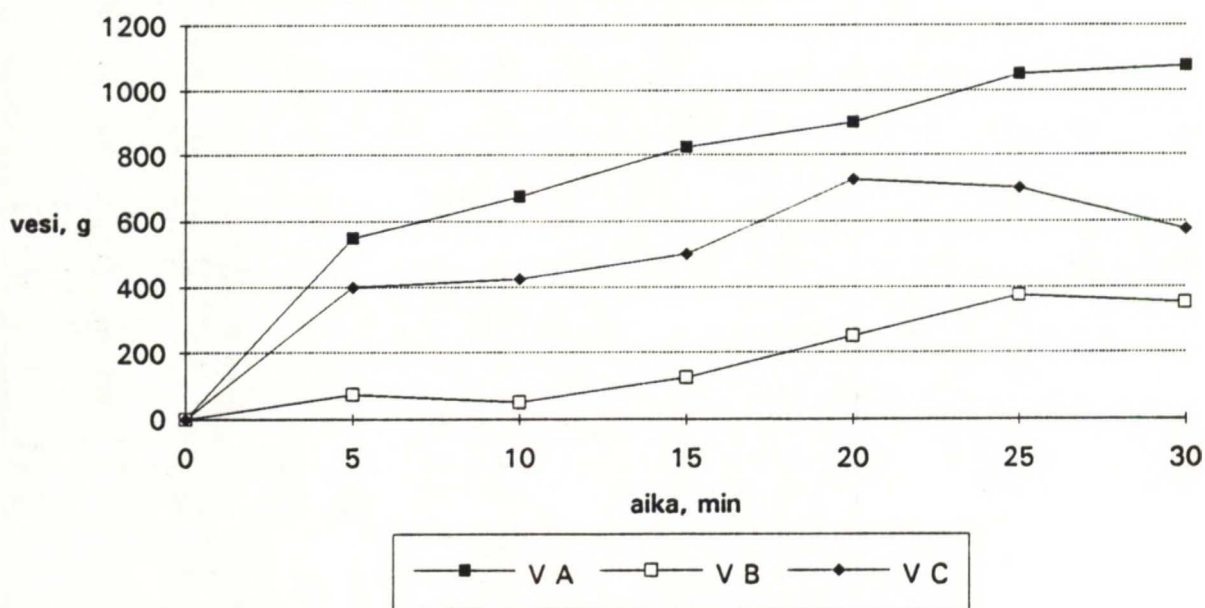
Kappaleessa oleva vesi, tasainen paine



Kuva 7.

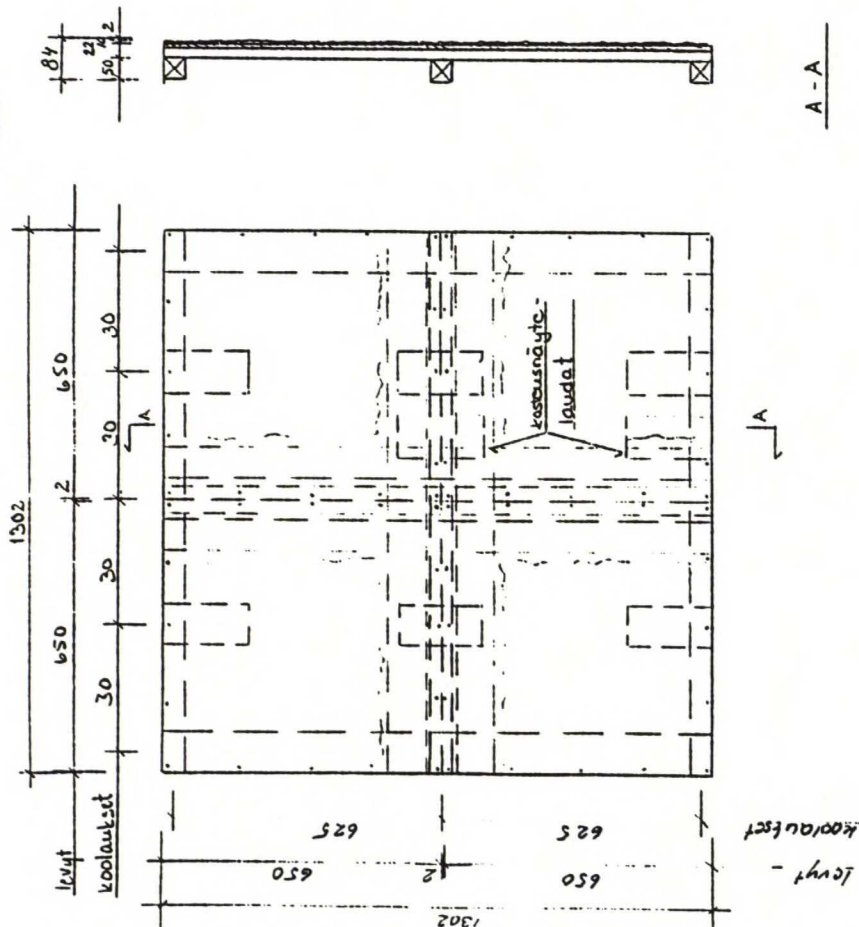
Saumallisessa rakenteessa V oleva vesimäärä vakioaineessa. Avonaisen pysty-
sauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Tiivistetty ruuvi ja esiporaus.

Kappaleessa oleva vesi, muuttuva paine 0 - 50 Pa



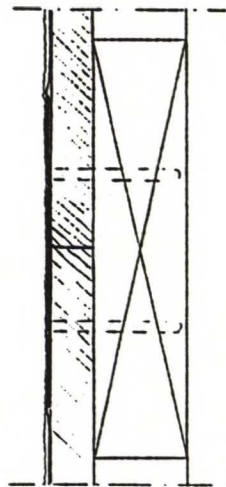
Kuva 8.

Saumallisessa rakenteessa V oleva vesimäärä asteittain nousevan paineen aikana.
Avonaisen pysty-
sauman taustamateriaalina EPDM-kumikaista. Tiivistetty ruuvi ja esiporaus.



Koeseinä 1:10

vaakasuora koolaus 50x50
 pystysuora koolaus 22x100
 tukitappaleet 22x100, pituus 200
 blu-board -levyt 10mm
 Ruuvit 40x0-rakentajaruuvi (4,2x15 mm), kappalestava
 Saumarakenteen kts. viereisen kunnan
 Raportin pinta-ala
 Seuraavaksi se on alareunasta
 Vaakasuorassa ja alareunasta koolausnäytelehdet 22x100, pituus 200



Levyssauma 1:1

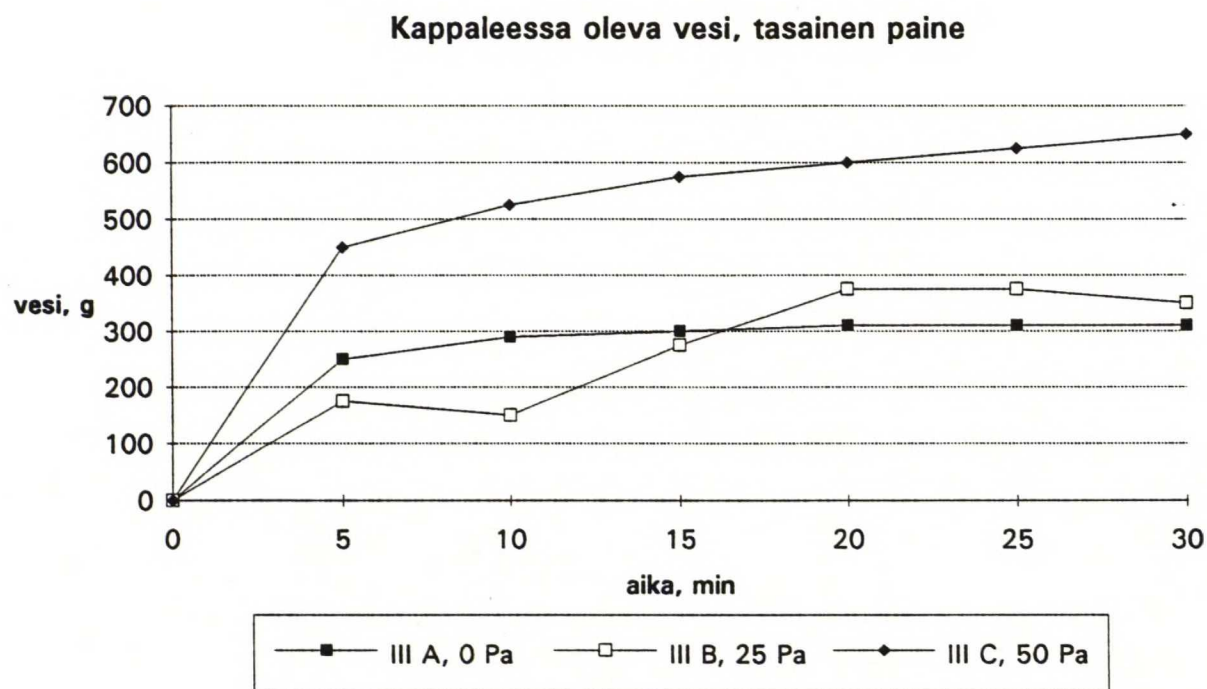
Kuitusaumanauha (Tyvec) 66 mm leisa
 Lomituverho 250 mm
 Pohjarappaus SIO-RFP n 300mm, paksuus 3m
 Pintarappaus STOLIT k2 kolopinnalla, paksuus 2m

Sadetuskoe

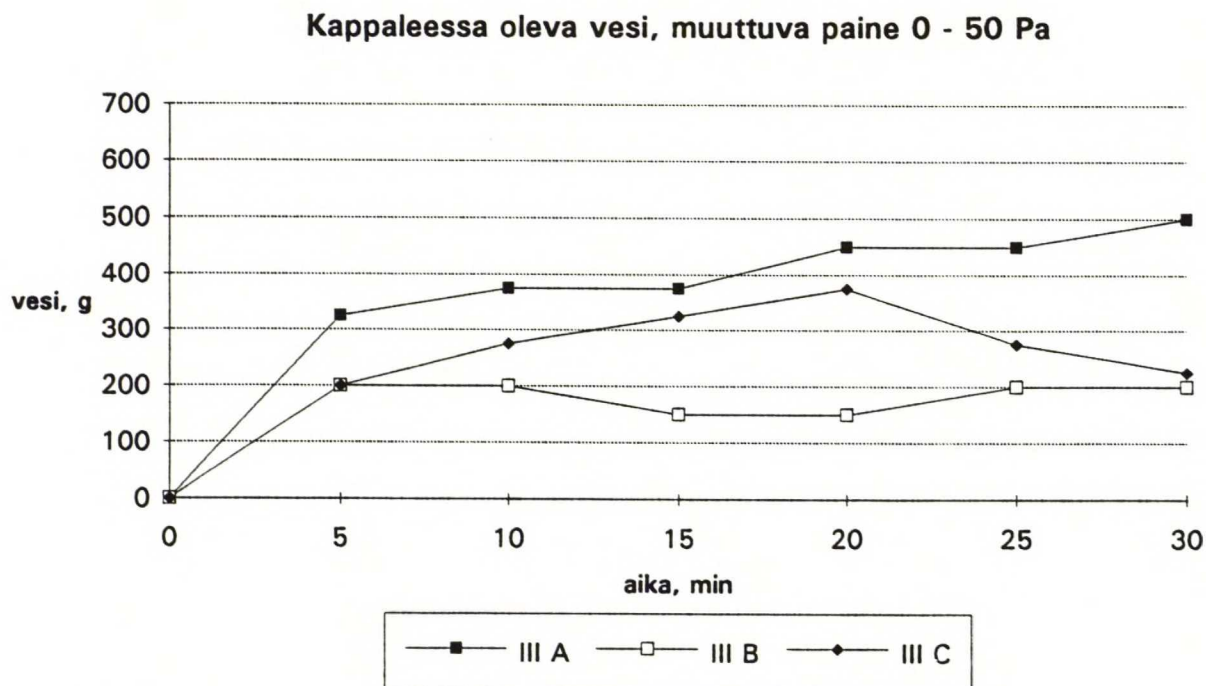
Koerakenne III

Sauman levyssä

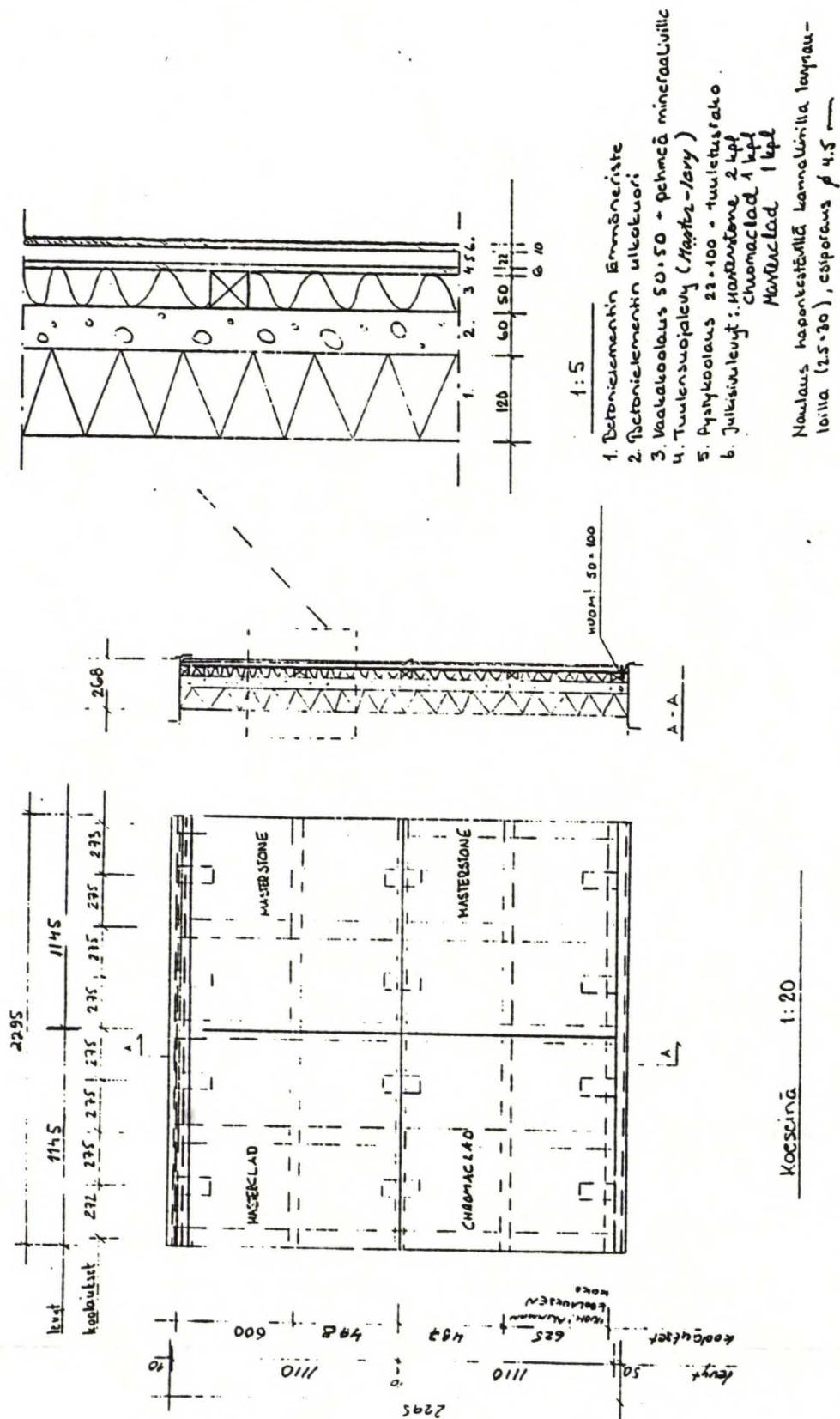
SADETUSKOEKESSESA RAPATTUUN RAKENTEESEEN IMEYTYNYT VESIMÄÄRÄ



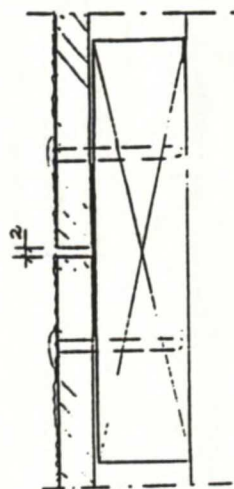
Kuva 1. Saumattomaksi pinnaksi rapatussa rakenteessa oleva vesimäärä vakioaineessa.



Kuva 2. Saumattomaksi pinnaksi rapatussa rakenteessa oleva vesimäärä asteittain nousevan paineen aikana.



Säärasituskoos
Kosrakenne I (2295, 2295)
Saumallinen levyrajaus
Tasokuva, leikkaus

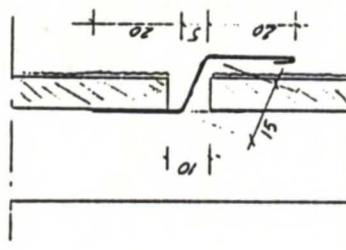


Julkisivulevyn pystysauma 1:1
Pystysauma yhtenäinen kumi-
kaista, leveys 40 mm (EPDM)

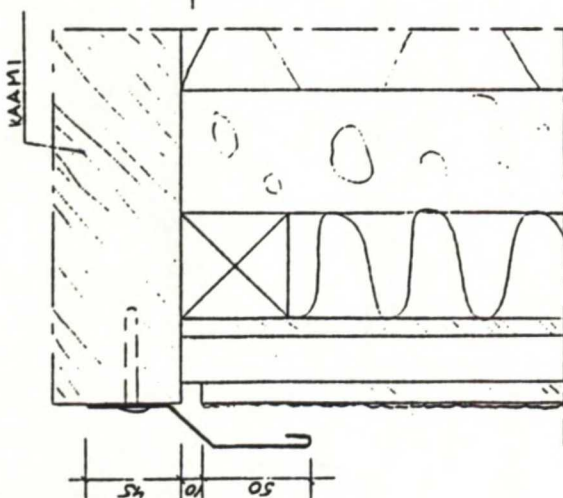
Kumikaista 1:1



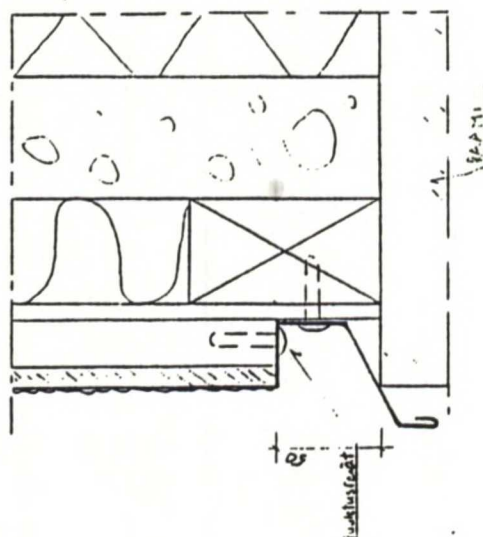
Julkisivulevyn vaakasauma 1:1
Vaakasauma yhtenäinen
vaakasaumalista
(pinnoitettu pelti)



Seinän yläosa 1:2
Vempeli kiinnitetään
seinäraamun
(pinnoitettu pelti)



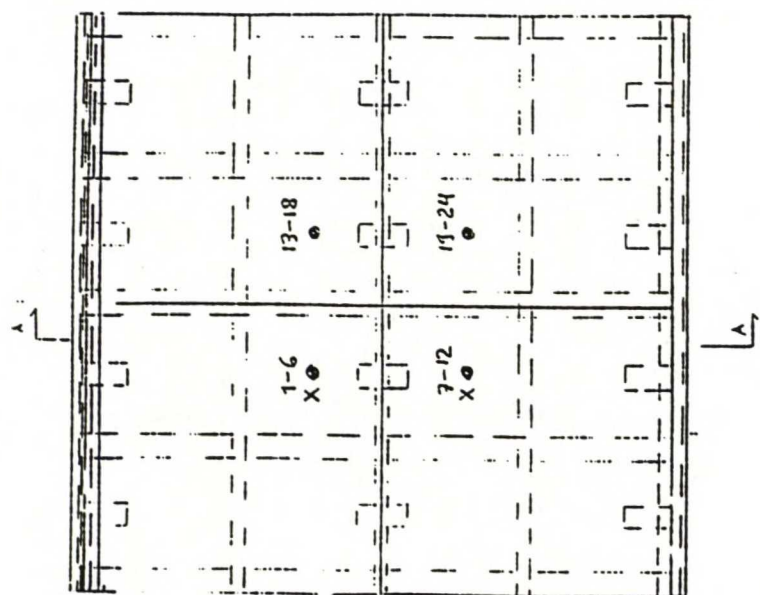
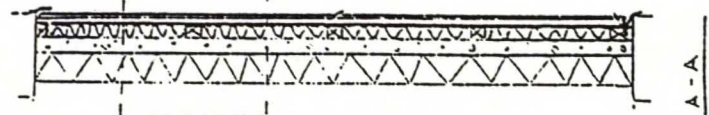
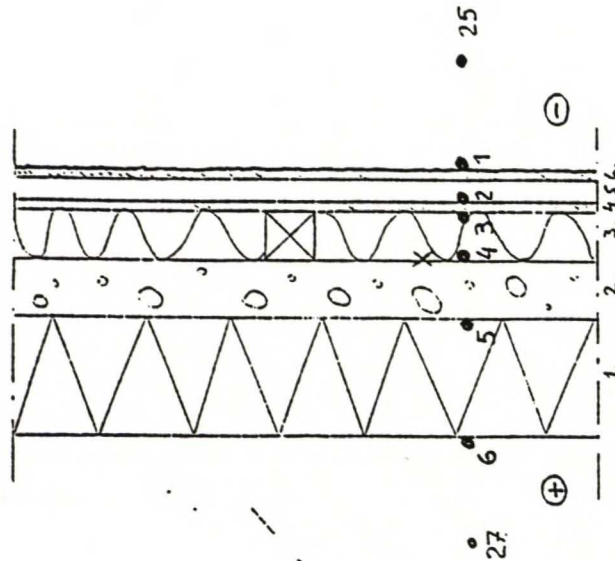
Seinän alareuna 1:2
Alareunan reikäpelti
kiinnitetään
alimpaan vaakasaumaan
(pinnoitettu pelti)

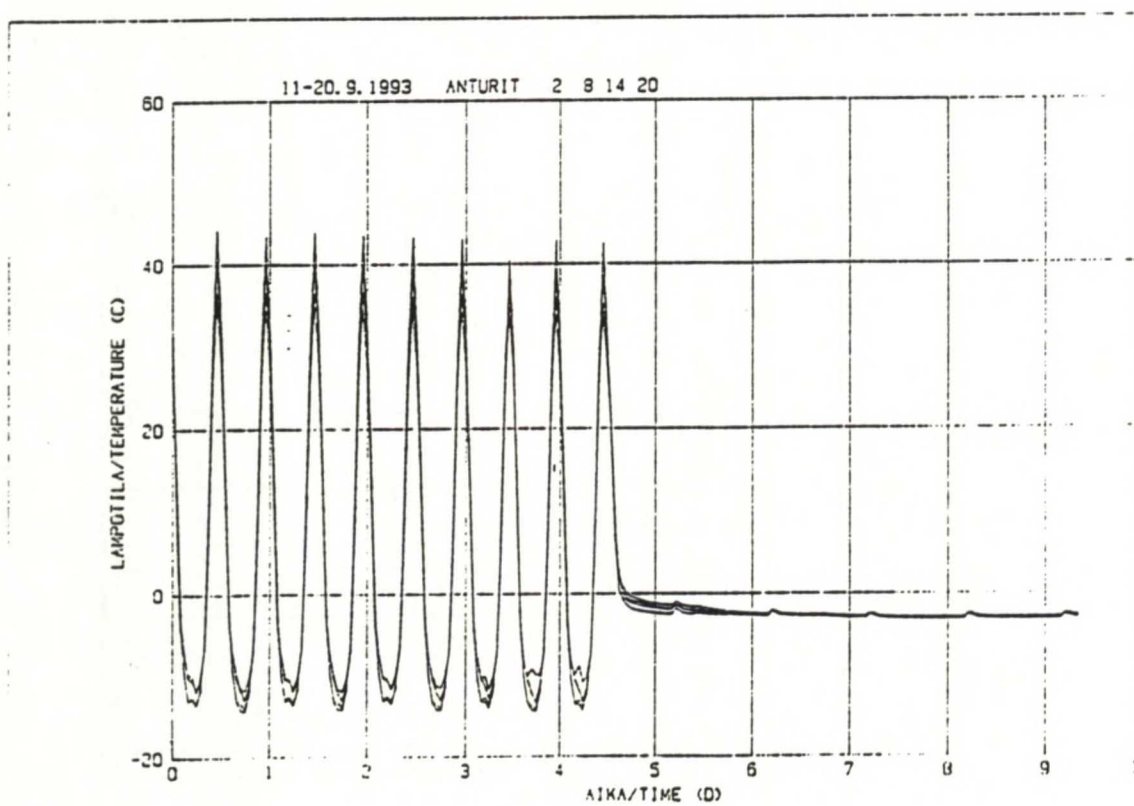
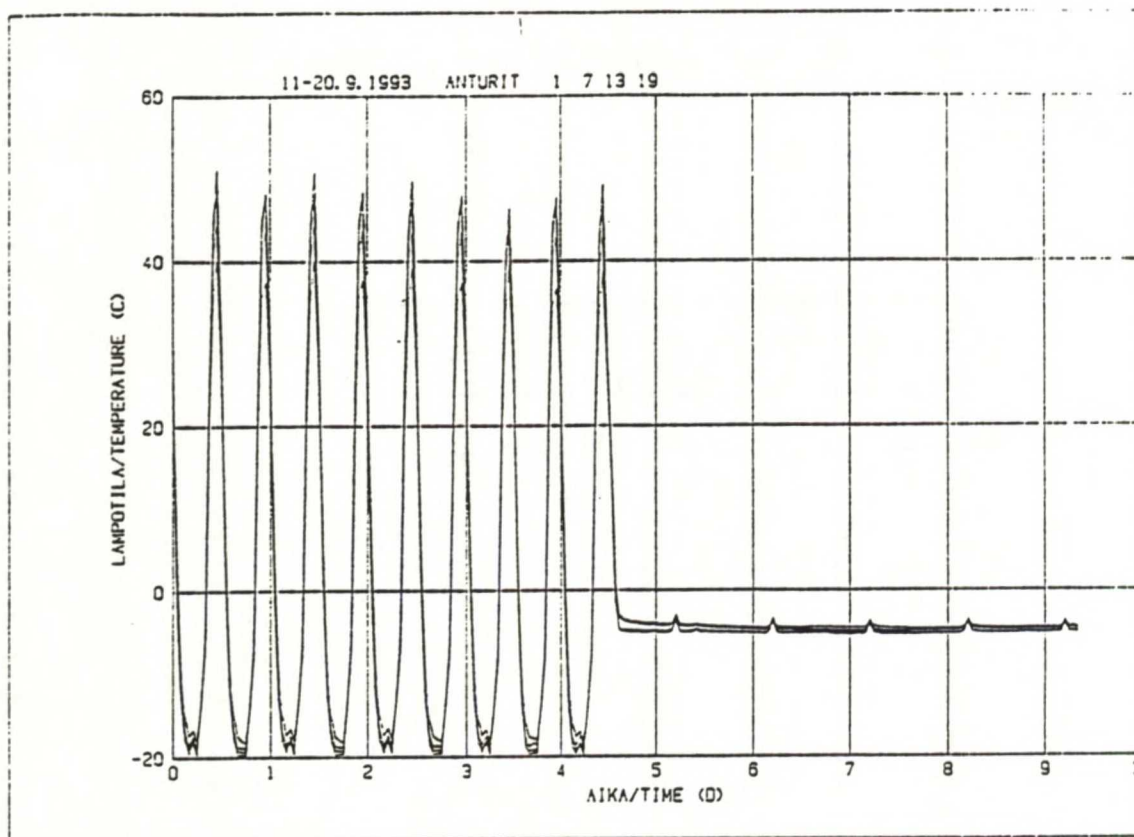


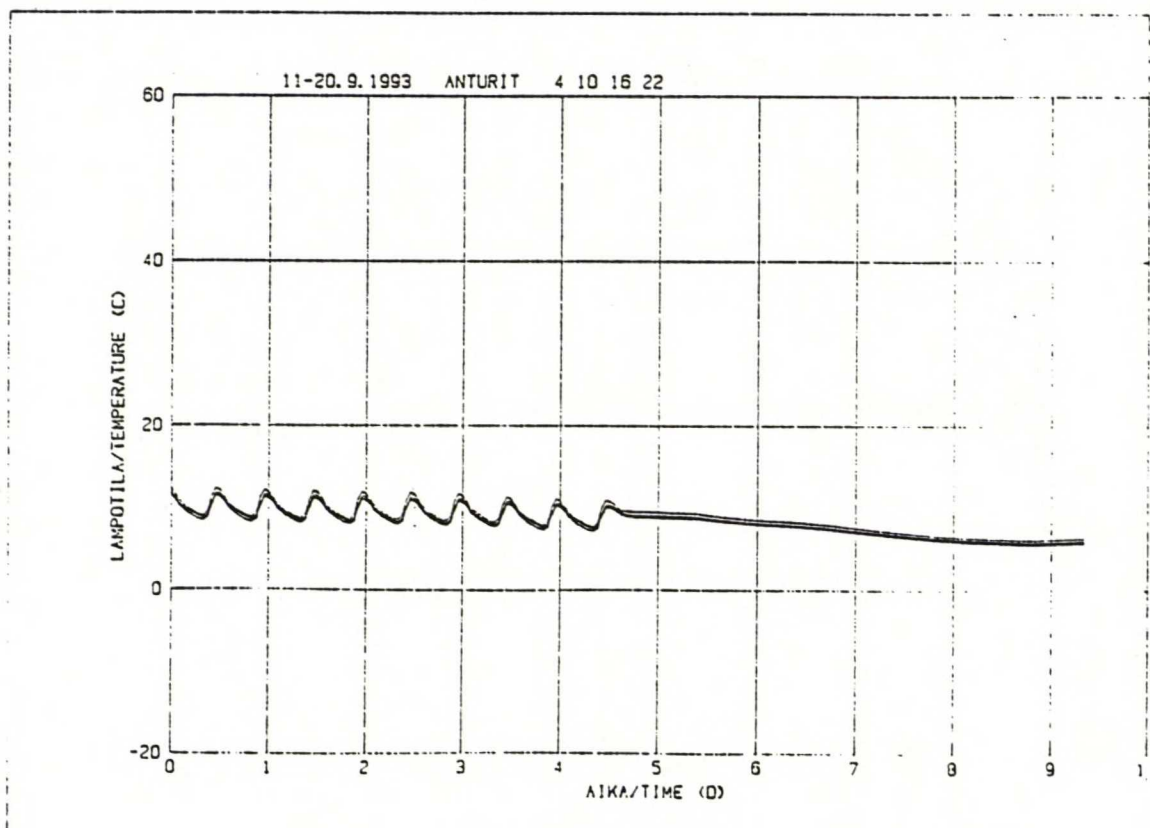
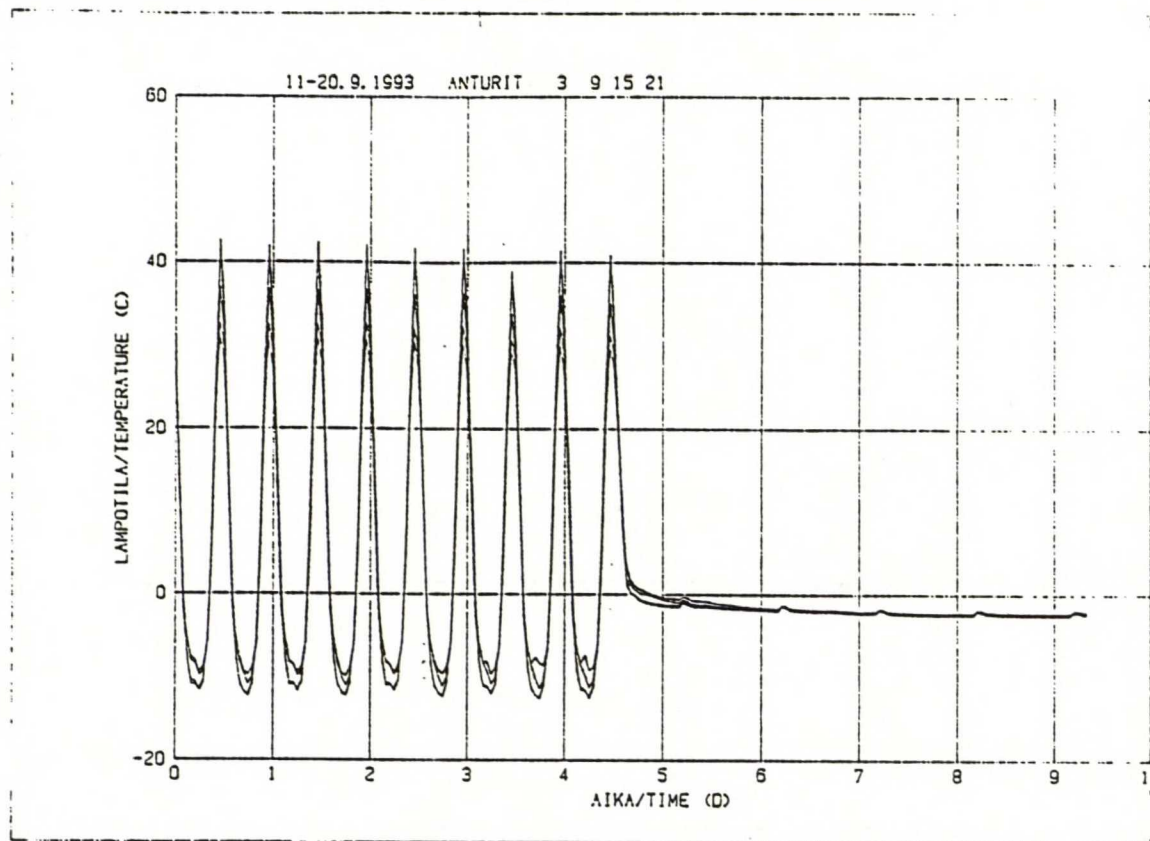
| | |
|-------------------------|---|
| Säärasitusko | |
| Koerakenne I | |
| Saumanlinen levykorjaus | |
| Detaljeja | 2 |

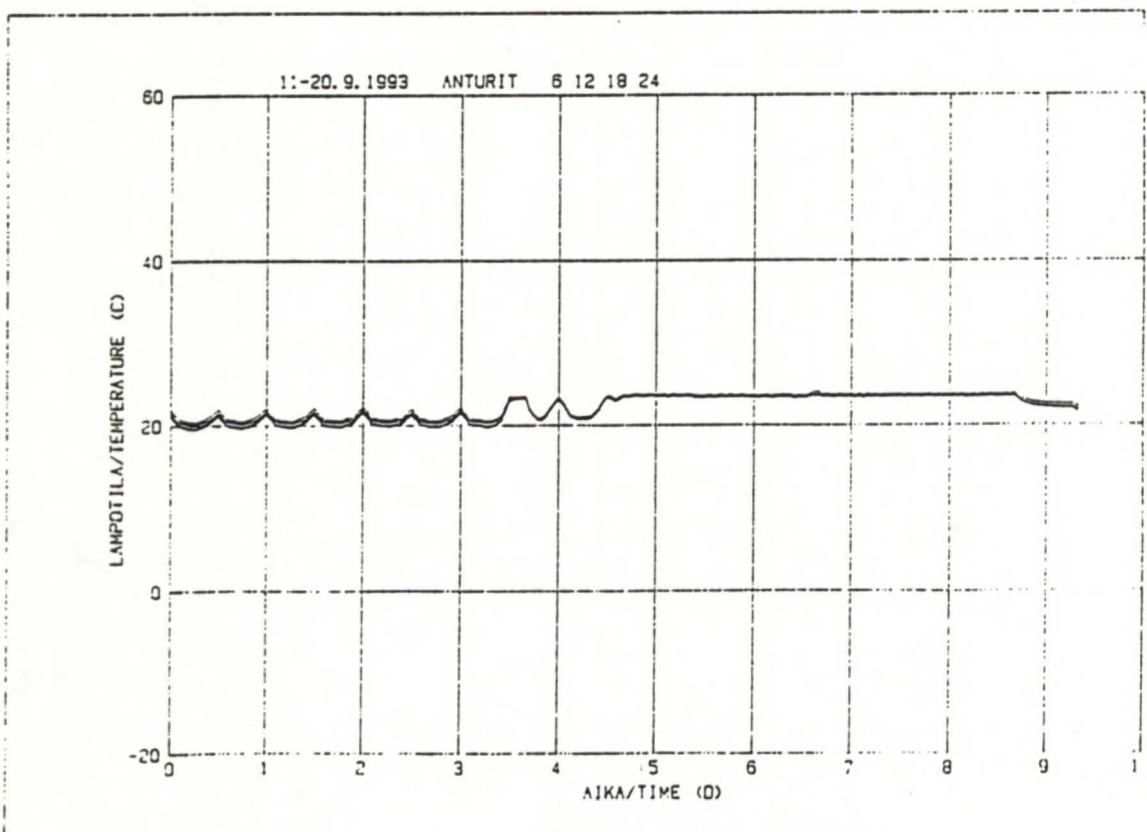
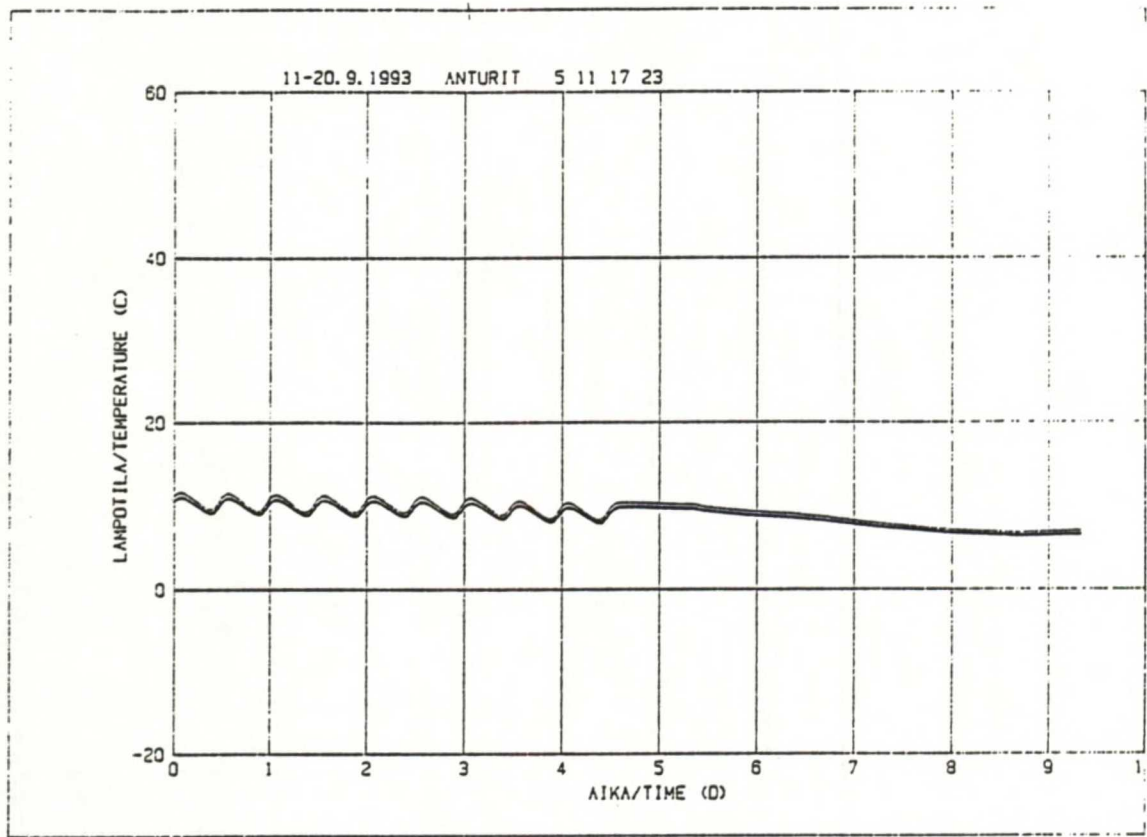
LÄMPÖTILA- JA LÄMPÖVIRTA-ANTURIT. MITTAUSTULOXSIA

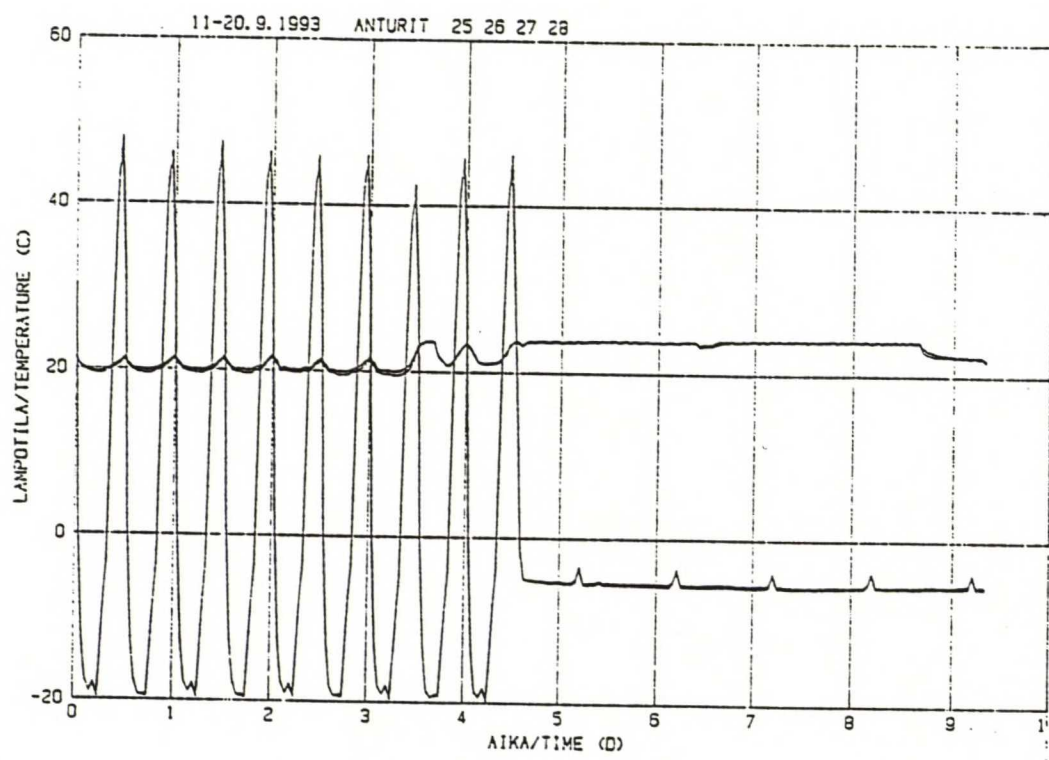
Lämpötila ⊙
Lämpövirta x







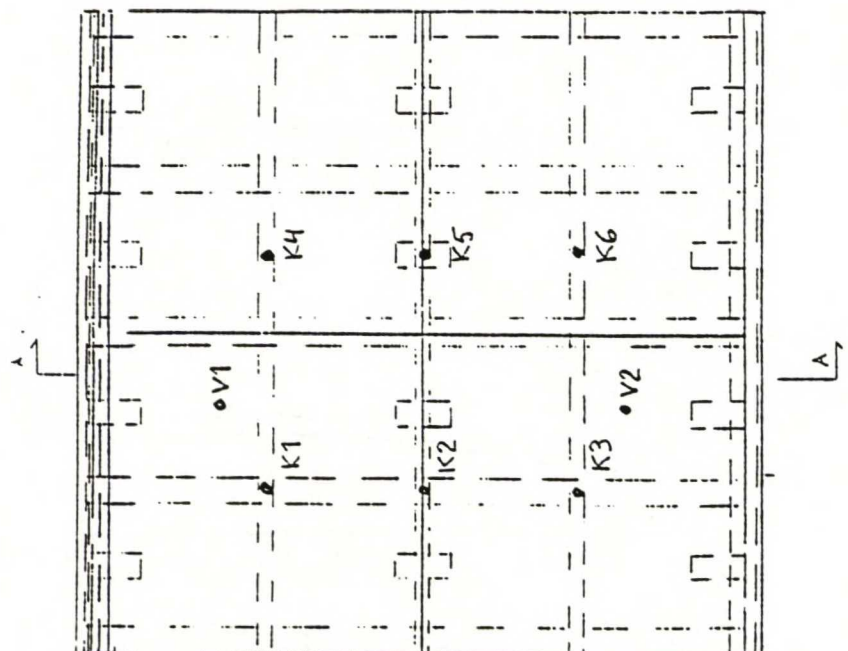
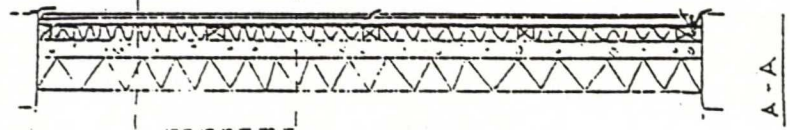
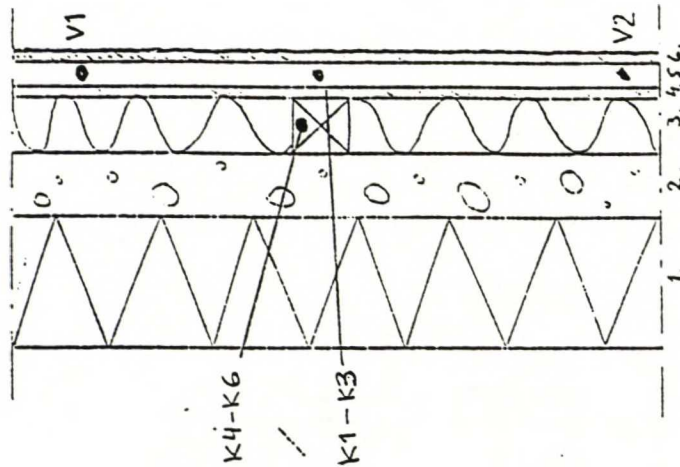


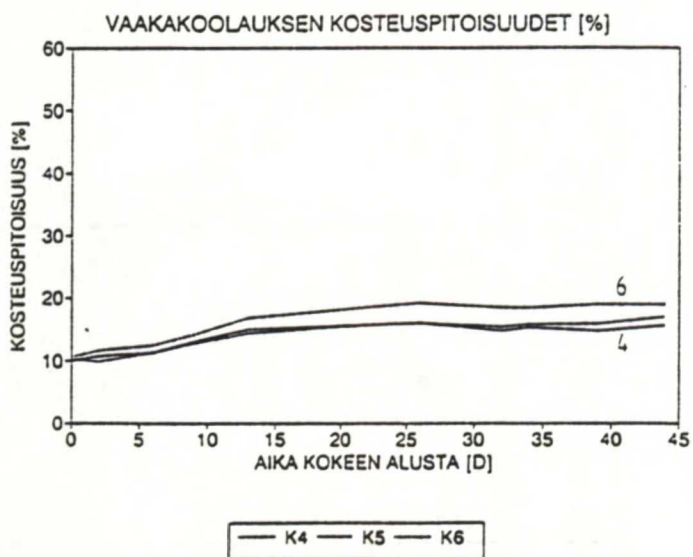
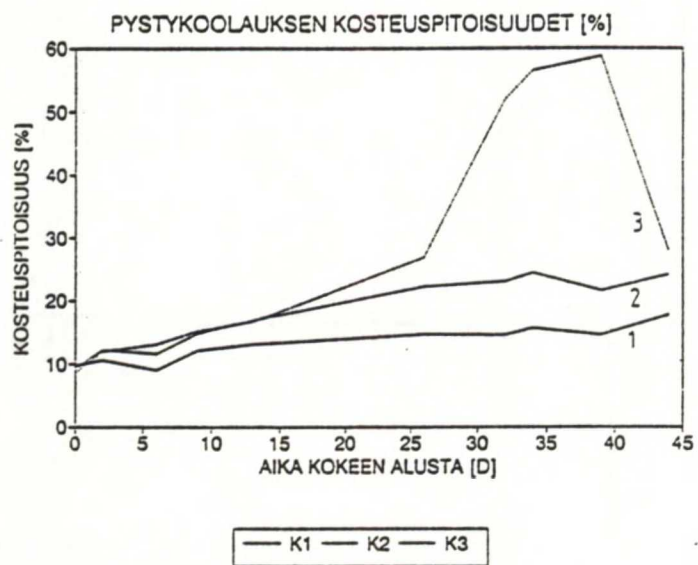
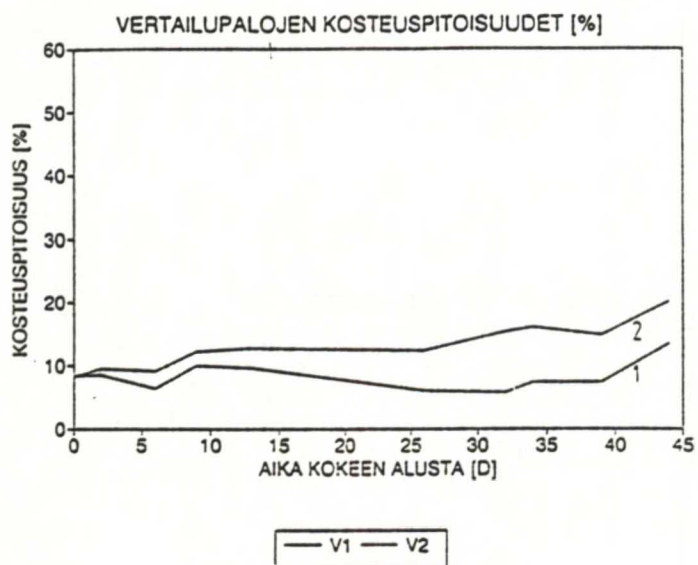


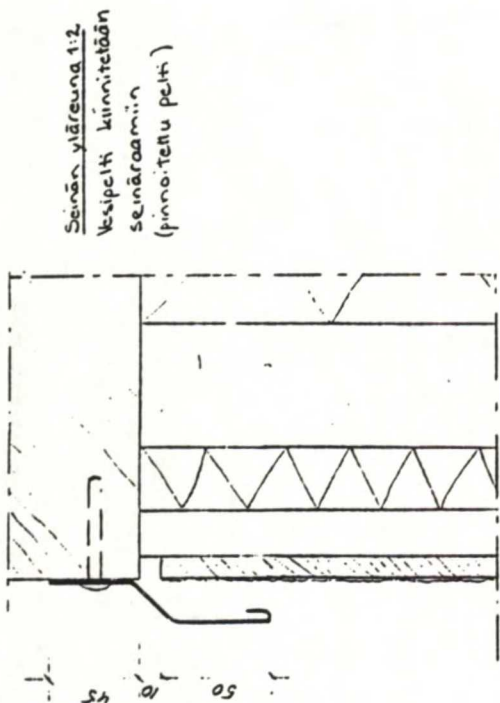
KOSTEUSANTURIT. MITTAUSTULOKSIA

Vertailupalat V1 - V2

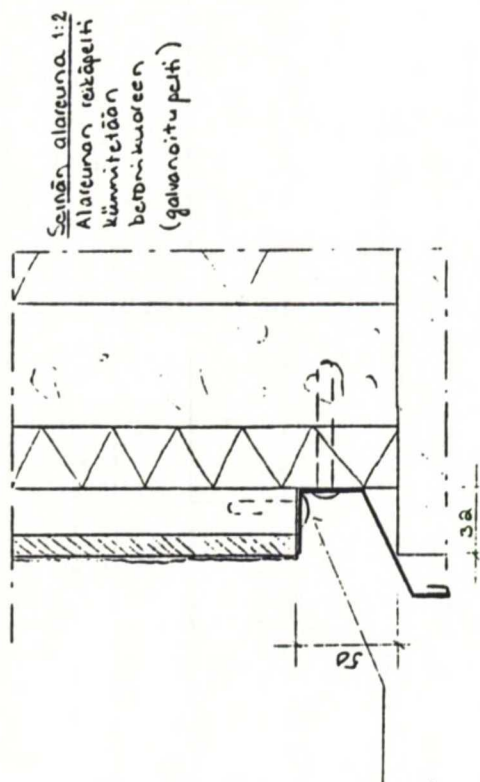
Puun kosteusanturit K1 - K6



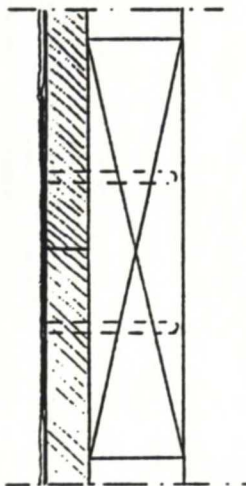




Seinän yläreuna 1:2
Keskipeitti kiinnitetään
seinäraudoittain
(pinnoitettu pelti)



Seinän alareuna 1:2
Alareunan reikäpeitti
kiinnitetään
betonikuoreen
(galvanoitu pelti)



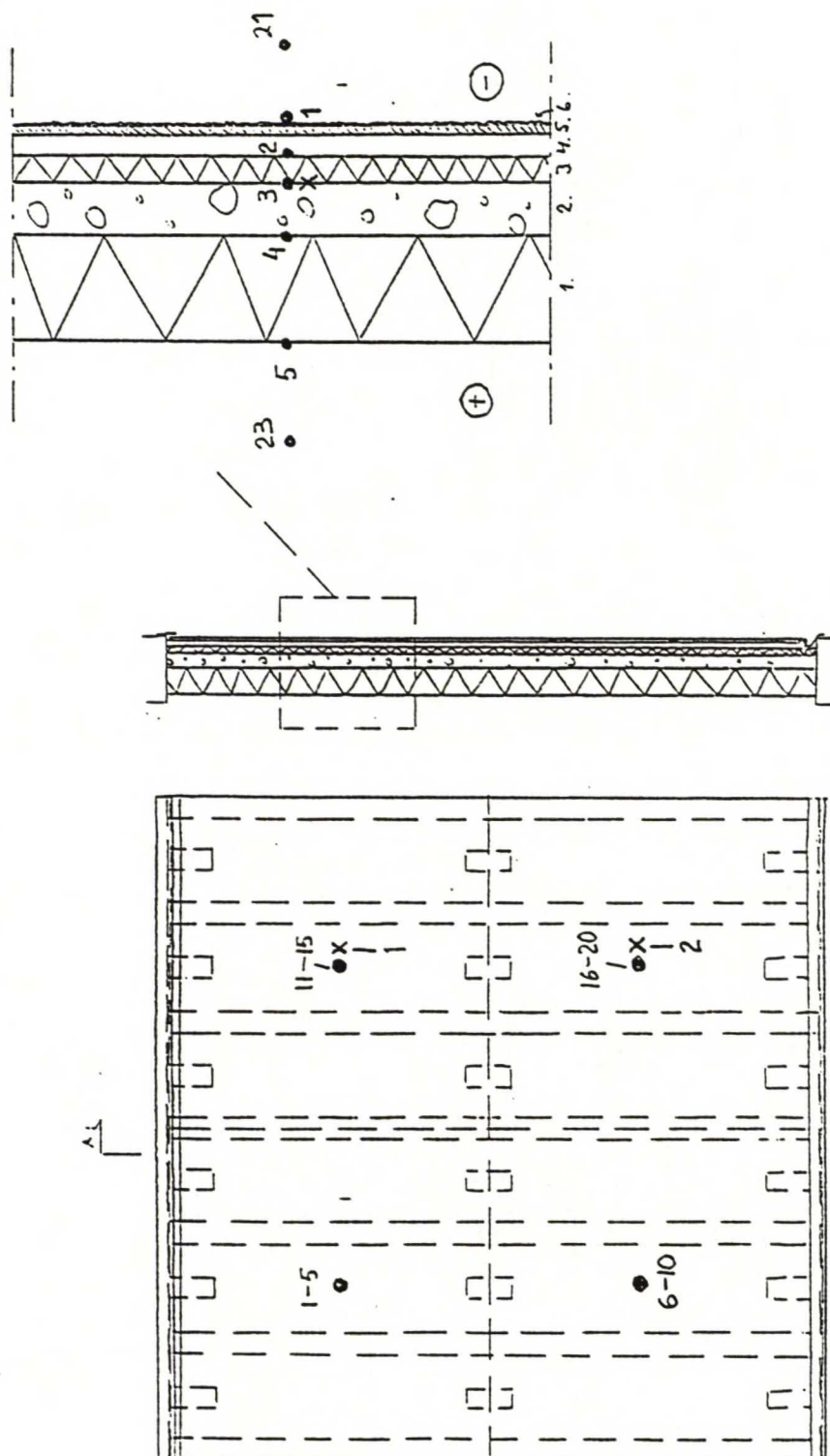
Levyosauma 1:1
Kiutusaukomaalaus (tyyppi) 66 mm
Laskituvuus 250 mm
Pohjarappaus n. 3 mm
Pintarappaus n. 2 mm

| | |
|----------------------------|---|
| Säärsituntolo | |
| Korotus II (2005 + 2005) | |
| Päälle rapotti levykorjaus | |
| Detaljeja | 4 |

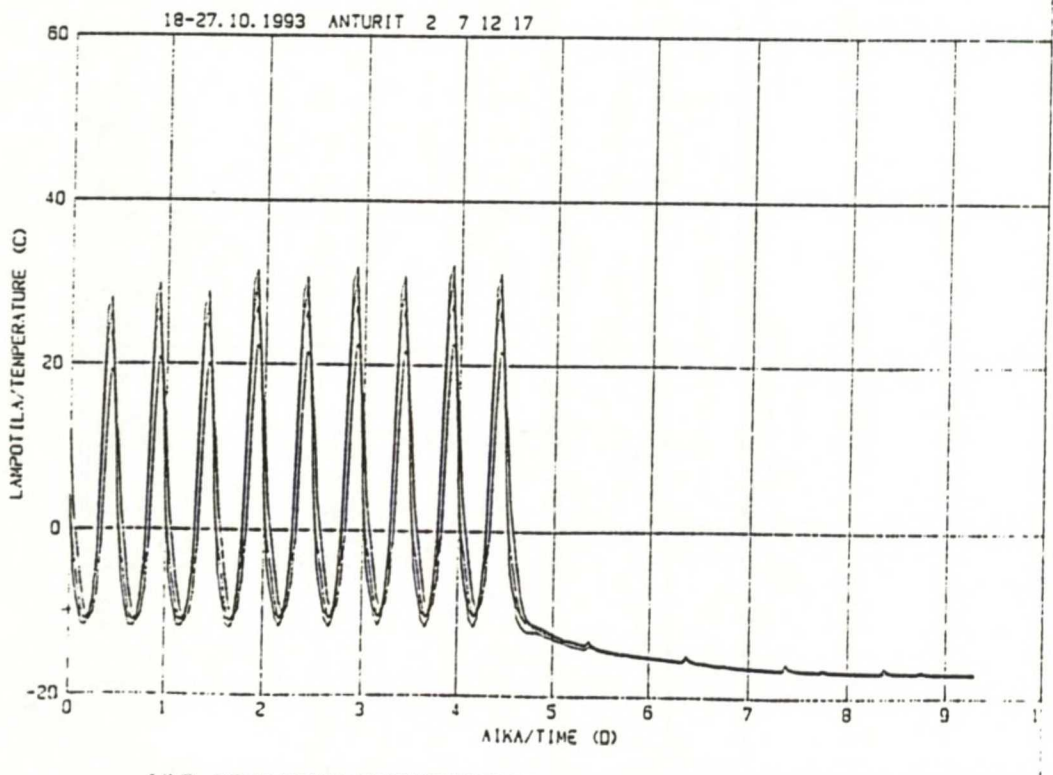
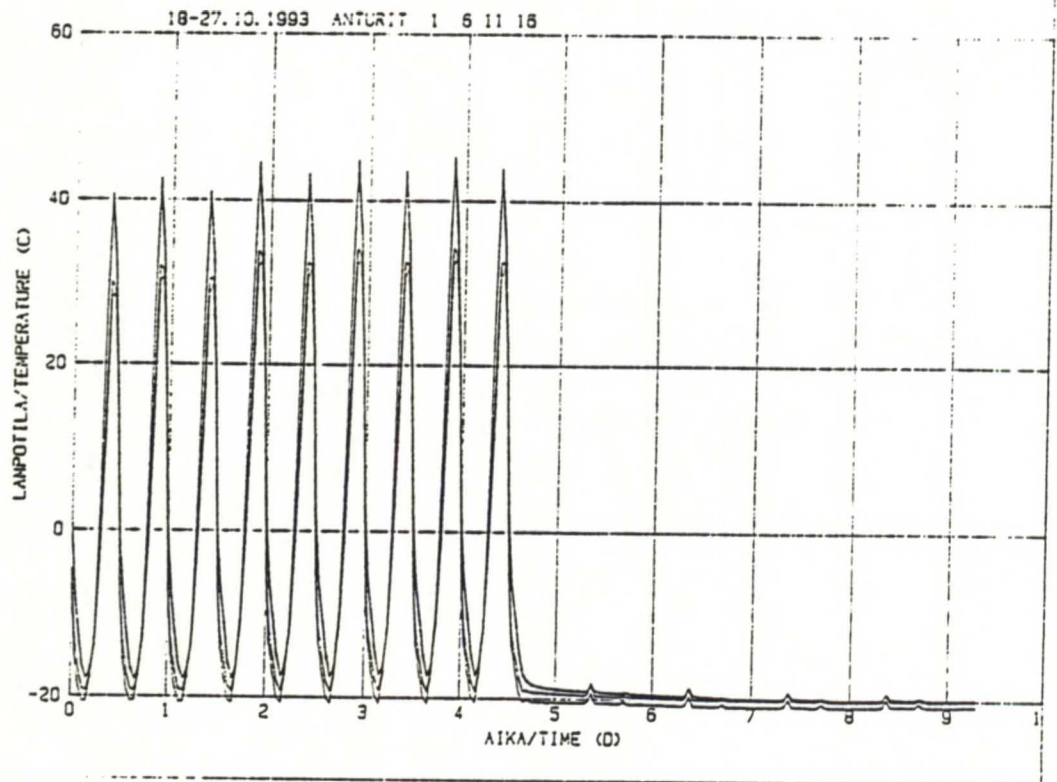
LÄMPÖTILA- JA LÄMPÖVIRTA-ANTURIT. MITTAUSTULOKSIA

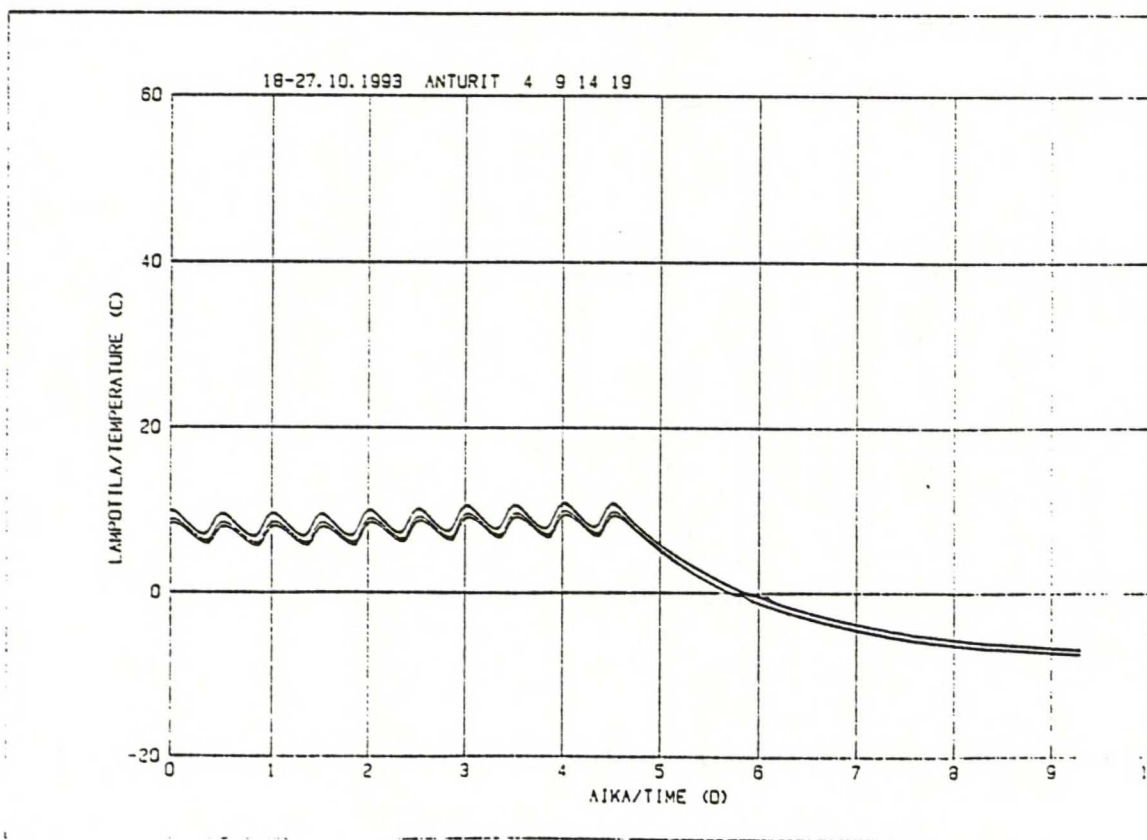
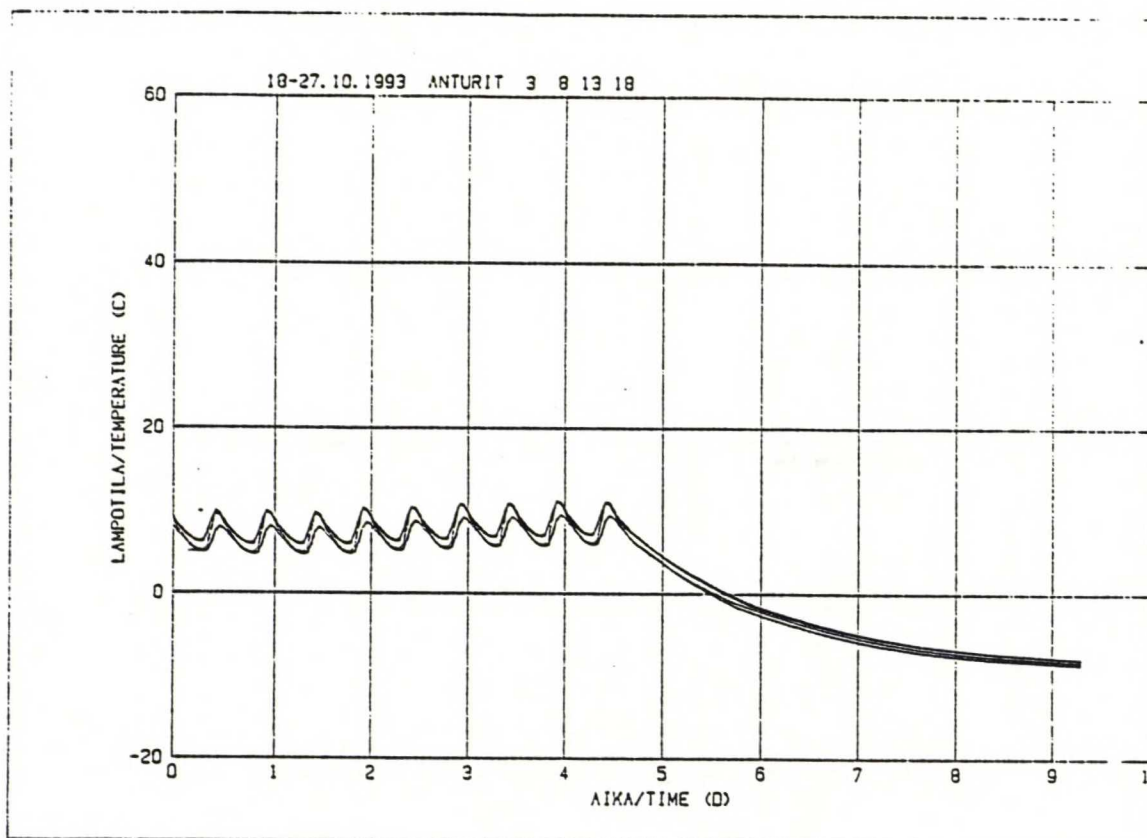
Lämpötila ⊙

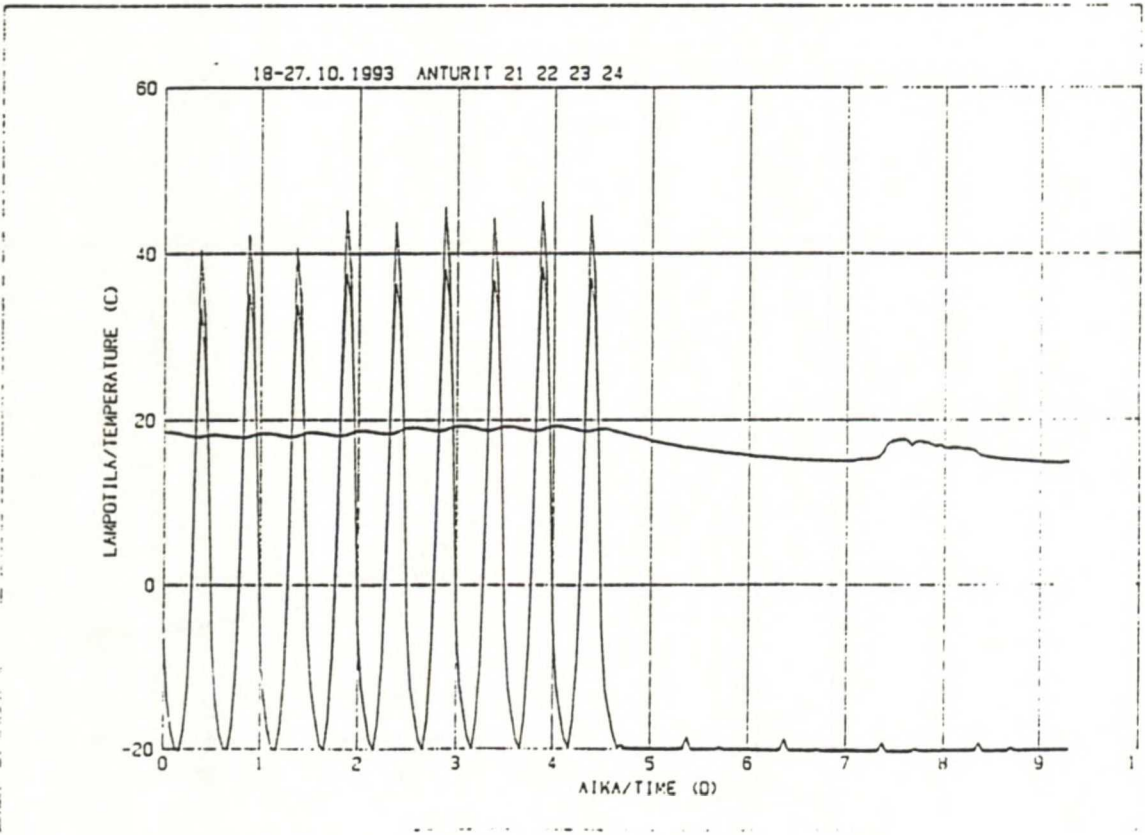
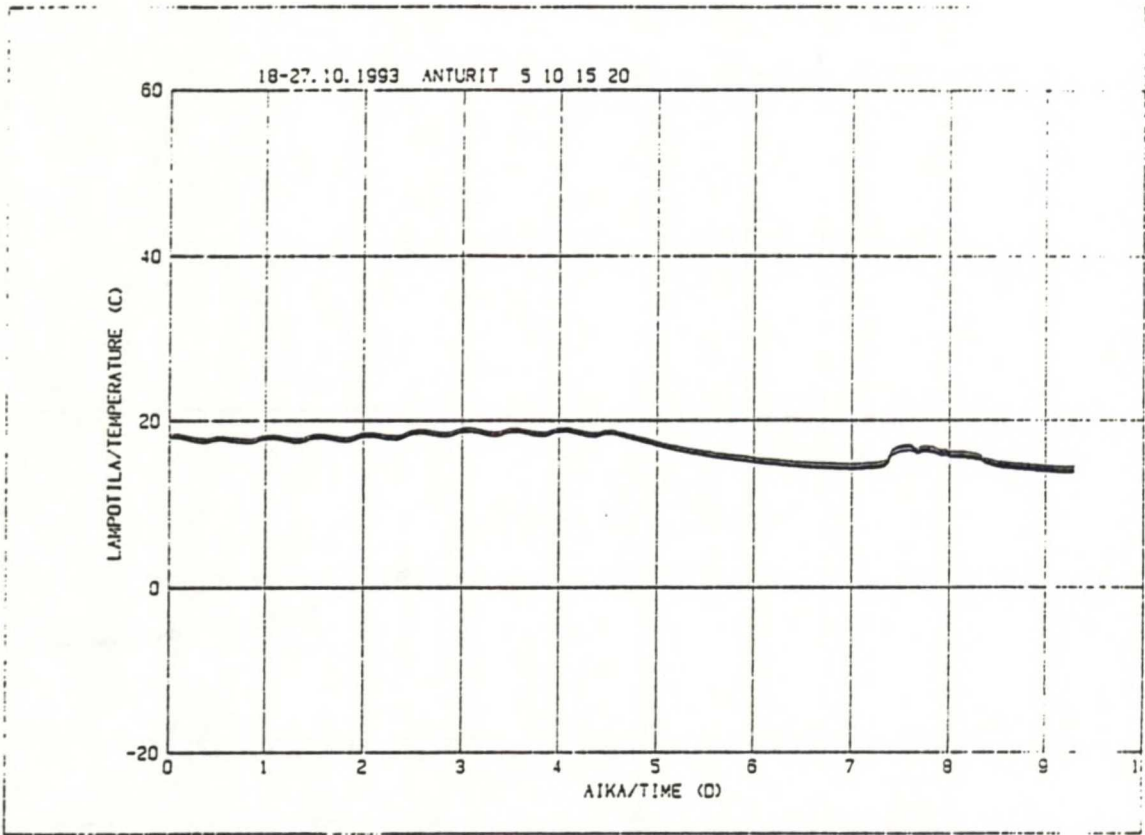
Lämpövirta x



Koosinä 1:20



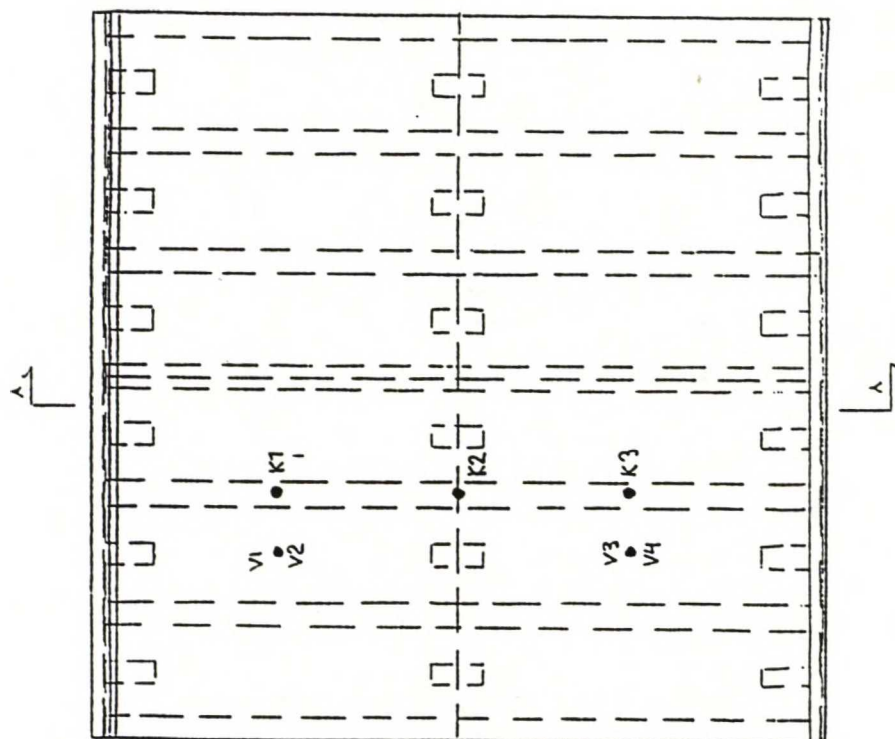
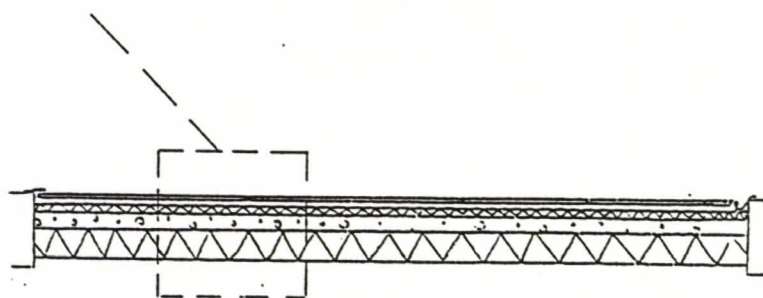
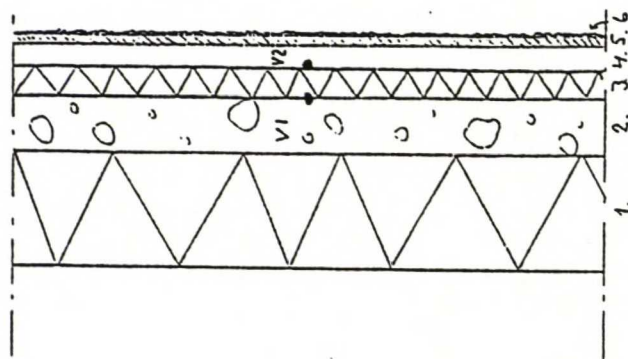




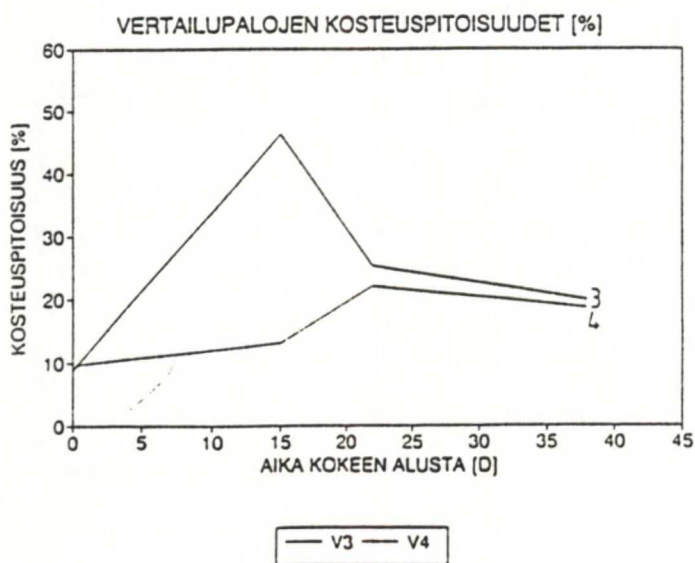
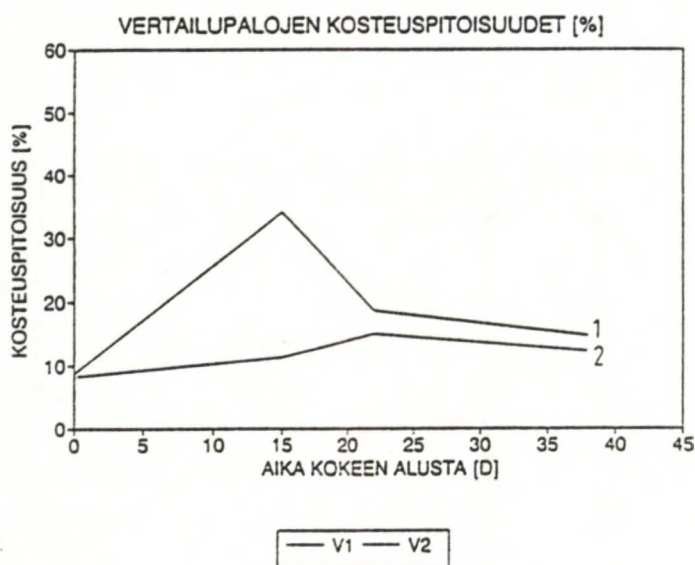
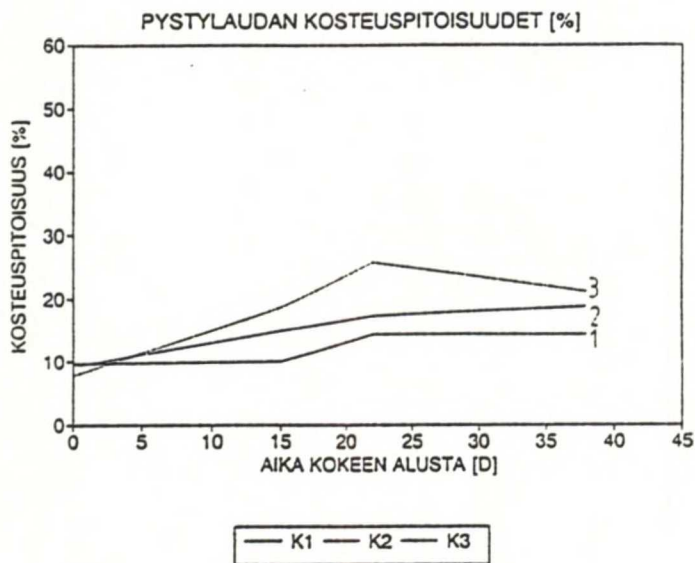
KOSTEUSANTURIT. MITTAUSTULOKSIA

Vertailupalat V1 - V4

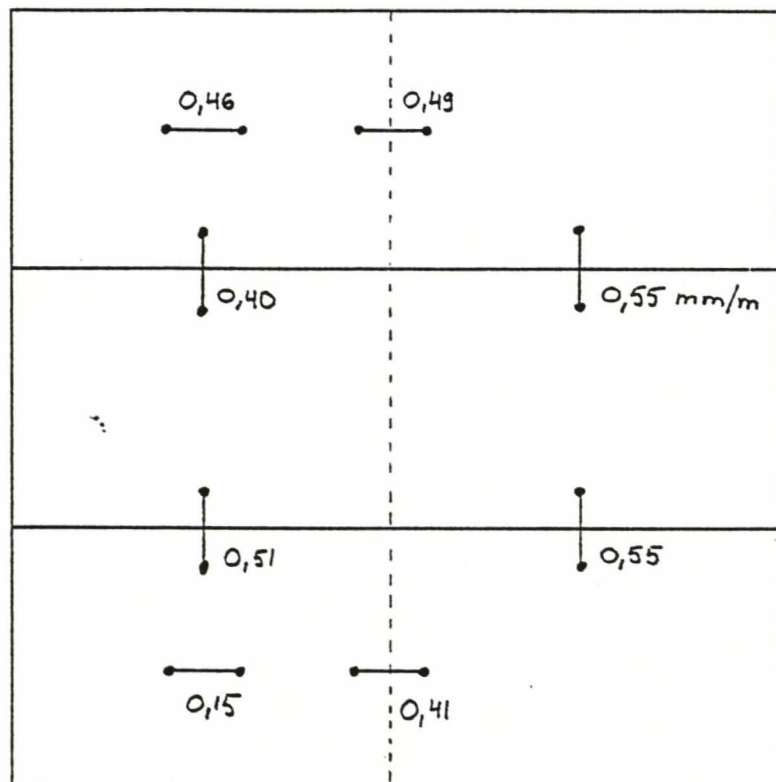
Puun kosteusanurit K1 - K3



Koesinä 1:20



MUODONMUUTOSMITTAUKSET. MITTAUSPISTEET JA SUURIMMAT
MUODONMUUTOKSET



Saumattomaksi pinnaksi rapattavalla kalsiumsilikaattilevyllä tehtävän korjauksen yksikkökustannuslaskelma. Aluslevy BluClad. Pohjarappaus Sto Armieringsputs ja pinnoite Sto-lit 2 mm.

| Työvaihe / tarvike | Hankintakustannus / umpi-m ² | | | Työkustannus / m ² | | RAM | Yht |
|---|---|----------------|--------|-------------------------------|--------|-----|--------|
| | määrä | yks. | mk | tth | mk | % | |
| Telinetyöt (hissityölava 3000 kg) | 1,0 | m ² | 22,00 | 0,10 | 4,90 | 0 | |
| Vaakakoolaukset 50x50 k 600 | 2,0 | jm | 6,10 | yht 0,50 | 33,50 | 100 | |
| Mineraalivilla 50 mm | 1,05 | m ² | 10,30 | - | | | |
| Tuulensuojalevy | 1,05 | m ² | 7,30 | - | | | |
| Tuuletusrimat 22x100 k 600 | 2,0 | jm | 5,60 | yht 0,45 | 30,20 | 100 | |
| Verhouslevyt ja kiinnikkeet | 1,05 | m ² | 77,80 | - | | | |
| Saumateippi | 1,2 | jm | 3,70 | yht 0,80 | 53,60 | 100 | |
| Rappausverkko | 1,30 | m ² | 18,20 | - | | | |
| Pohjarappaus | 4 | kg | 80,00 | - | | | |
| Pintarappaus | 2 | kg | 32,00 | - | | | |
| Pellitykset | 1,0 | m ² | 15,10 | 0,30 | 20,10 | 100 | |
| Syöksyjen irroitus ja kiinnitys | 1,0 | m ² | 6,90 | 0,15 | 10,00 | 100 | |
| Suojaus | 1,0 | m ² | 3,30 | 0,23 | 15,40 | 100 | |
| Avustavat työt | 1,0 | m ² | 3,00 | 0,06 | 4,00 | 100 | |
| Hankintakustannus / umpiseinäala | | | 291,30 | | | | |
| Sosiaalikulut | 60 | % | | | 103,00 | | |
| VÄLITTÖMÄT KUSTANNUKSET MK/M ² | | | 190,70 | | 274,70 | | 465,40 |
| Yhteis- ja yleis- kustannukset | 30 | % | | | | | 139,60 |
| YHTEENSÄ MK/M ² | | | | | | | 605,00 |